

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Iva Ćuk

Diplomski rad

**Procjena seizmičke opasnosti primjenom
programskog paketa ShakeMap**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Snježana Markušić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Sažetak

Seizmičnost Hrvatske posljednjih je godina slaba do srednja, a najaktivniji su obalni i sjeverozapadni dijelovi gdje su naseljenost i seizmički hazard najveći. Važan alat pri detektiranju potencijalne šteta i ugroženosti su karte potresne opasnosti (*ShakeMap*) i njihovi scenariji koji prikazuju očekivanu prostornu raspodjelu zabilježenih i/ili procijenjenih iznosa intenziteta potresa na određenom području. Osim toga, karte daju uvid u raspodjelu vršne brzine i ubrzanja te spektra odziva na potresnom području. U ovom radu, generirane su karte potresne opasnosti za seizmičke zone Hrvatske koristeći digitalne zapise dostupne od 2002. godine te scenariji potresne opasnosti za povijesne potrese čiji digitalni zapisi ne postoje, a generiraju se na osnovi podataka o magnitudi i koordinate hipocentra. Kako promjenjivost u gornjem geološkom sloju ima važnu ulogu u prostornoj razdiobi intenziteta potresa koristili smo litološku kartu Hrvatske i izračunate brzine S valova u gornjih 30 metara (V_{s30}) kako bismo imali bolji uvid u očekivane amplifikacijske efekte.

Ključne riječi: *ShakeMap*, procjena seizmičke opasnosti, seizmičke zone, Hrvatska

Seismic hazard assessment using ShakeMap software

Abstract

Seismic activity of Croatia in last few years was weak to moderate and most seismically active were the coastal and northwestern parts where population density is high and infrastructure is vulnerable. Important tools in damage and hazard assessment are shakemaps and scenario shakemaps, which show the expected ground-shaking intensity distribution patterns and estimated peak ground motions (velocity, acceleration and response spectra). In this study we used digital ground motion recordings, available since 2002, to generate shakemaps for each seismic zone in Croatia and shakemap scenario of significant historical events of Croatia. Variability in near surface geology plays an important role in earthquake ground shaking; we use litology map of Croatia and calculated mean shear wave velocities down to 30 meters depth in order to have a better insight into the site amplification effects.

Keywords: ShakeMap, seismic hazard assessment, seismic zones, Croatia

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Programski paket ShakeMap.....	2
2.1	Primjena	2
2.1.1.	Način rada ShakeMap programskog paketa	3
2.1.2.	Primjena u Hrvatskoj	4
2.2	Relacije	5
2.2.1	Atenuacijske relacije.....	5
2.2.2	Ostale relacije	6
2.3	Prostorna korekcija	7
3	Ulazni podaci.....	9
3.1	Prikupljanje i priprema podataka	9
3.2	Podaci s Hrvatskih seizmoloških postaja.....	10
3.3	Obrada seizmograma	10
4	Scenariji potresa	11
5	Rezultati i diskusija	12
5.1	Seizmičke zone obalne Hrvatske	13
5.2	Seizmičke zone sjeverozapadne Hrvatske	29
5.3	Karte scenarija potresne opasnosti.....	38
6	Zaključak.....	47
7	Literatura	49

1. Uvod

Karte potresne opasnosti (*ShakeMap*) [1] su karte koje pokazuju prostornu raspodjelu zabilježenih, i na osnovi atenuacijskih relacija procijenjenih, vršnih gibanja (brzina, ubrzanje i spektar odziva) te procjenjuju odgovarajući intenzitet potresa na zahvaćenom području s ciljem brzog informiranja javnosti, boljeg planiranja i hitnih intervencija tamo gdje su iste najpotrebnije. Znamo da su magnituda i lokacija epicentra prve dostupne informacije odmah nakon destruktivnog potresa. No, model potencijalne štete nije funkcija samo ta dva parametra. Za točniju i detaljniju procjenu situacije potrebno je više informacija [2] što najbolje pokazuje potres magnitude $M = 6.7$ koji se dogodio u sjevernoj dolini San Fernanda u Kaliforniji 1971. godine, te koji je najveću štetu uzrokovao na području 15 km udaljenom od epicentra, kao i potres $M = 6.9$ u Japanu 1995. godine gdje je šteta u punoj mjeri bila prepoznata tek nakon nekoliko sati [3], što je ozbiljno usporilo spasilačku intervenciju i pomoć. Zato je razvijen programski paket za izradu karata potresne opasnosti koji opisuje gibanje tla uzrokovano potresom te je koristan za brzu procjenu opsega gibanja tla i potencijalnih šteta uzrokovanih potresom. Karte daju informacije koje ne opisuju sam izvor potresa, nego su fokusirane na gibanje tla uzrokovano potresom i na njegove posljedice. Širenjem valova kroz prostor, dolazi do različitih gibanja tla koja ovise o udaljenosti od rasjednog segmenta, svojstvima tla te promjenjivosti širenja seizmičkih valova kroz složenu Zemljinu strukturu.

Na području Hrvatske seizmički najaktivniji su obalni i sjeverozapadni dio, gdje se kroz povijest bilježe mnogi snažni potresi, a najjači je pogodio Dubrovnik. Seizmička aktivnost posljednjih je godina slaba do umjerena, a najveći broj potresa lociran je na obalnom dijelu [4]. U ovom radu kreirane su karte potresne opasnosti za potrese od 2002. godine, tj. za potrese čije digitalne zapise posjedujemo. Kako je Hrvatska podijeljena na 17 seizmičkih zona [5], cilj je bio na području obalne i sjeverozapadne Hrvatske, unutar svake zone, napraviti barem po jednu reprezentativnu kartu potresne opasnosti potresa s najvećom magnitudom. Kreirano je ukupno 17 karata za svako područje, od kojih je većina za obalni dio Hrvatske. Također, kreirani su scenariji potresne opasnosti za neke od najvažnijih povijesnih potresa, počevši od velikog Dubrovačkog potresa iz 17. stoljeća i drugih koji su svojim djelovanjem ostavili trag na Hrvatskom području.

2. Programski paket ShakeMap

Programski paket ShakeMap osmislio je David Wald za područje Kalifornije, a za njegov dizajn i primjenu zaslužni su Wald i Quitoriano [1]. Htjeli su brz i automatski internetski prikaz gibanja tla na svakoj stanici, generiran za svaki novi potres, uključujući lokaciju i mjerilo karte koja bi najbolje odgovarala za prikaz zahvaćenog područja. Zbog svoje namjene, program se brzo razvijao i širio u SAD-u. Osim u SAD-u karte potresne opasnosti su primijenjene i program je razvijan za Japan, Tajvan, Kanadu, Italiju, Tursku i Novi Zeland [6].

ShakeMap programski paket je skup modula koji rade na svim kompjuterskim platformama. Uglavnom je pisan programskim jezikom Perl i C. Perl, kao skriptni jezik, te predstavlja stil programiranja koji je različit od uobičajenih programskih jezika. Njegova je namjena komponiranje programa od gotovih aplikacija - komponenti, njihovim "lijepljenjem", čime se postiže viša razina programiranja i brži razvoj aplikacija. Kolekcija Perl modula omogućuje da obrada informacija teče u koracima koji se mogu izvršavati zajedno ili pojedinačno [7]. Unutar ovih skripti pozivaju se drugi programski paketi, posebno paketi koji omogućuju grafički prikaz i neka kompliciranija računanja. U dizajniranju karata potresne opasnosti sve su komponente građene od programskih paketa čiji je izvorni kod slobodno dostupan i može se redistribuirati i mijenjati. Kako Perl jezik nije najbrži mogući način izrade karata, teža i složenija računanja podržana su drugim optimiziranim programima (najčešće pisanim C jezikom), koji se pozivaju unutar Perl-a. Da bi omogućili prilagodbu za određene potrese ili za različite regije, svaki modul ima popratnu kolekciju konfiguracijskih datoteka. Npr. u te se datoteke dodaju državne granice i karakteristike kartiranja koje se koriste prilikom izrade karata, dodaju se atenuacijske relacije za određena područja, liste e-mail primatelja, itd. U svojoj srži, ShakeMap je seizmološki utemeljen interpolacijski algoritam koji koristi dostupne podatke gibanja tla i seizmološko znanje za izradu karata gibanja tla na lokalnoj i regionalnoj skali. Kao dodatak podacima koji su neophodni za realističan izvod i prikaz rezultata, osnove za dobivanje točnih karata su atenuacijske relacije, koje su funkcije udaljenosti na različitim periodima i različitim magnitudama te realni opisi amplifikacija [2].

2.1 Primjena

Programski paket je razvijen zbog urbanih područja, gdje je rizik najveći, stanovništvo u opasnosti, a hitna intervencija otežana zbog prostorne kompleksnosti. Brza

dostupnost karata potresne opasnosti može biti koristan alat organizacijama civilne zaštite, građanima i medijima, zato što pruža prvi izvještaj o potresanju i šteti uzrokovanoj destruktivnim potresom. Budući da je, zbog amplifikacije, moguć nastanak veće štete na udaljenijim mjestima od samog izvora, karte potresne opasnosti temeljni su prikaz koji opisuje raspodjelu intenziteta potresa, kako na bliskim tako i na udaljenim područjima. Algoritam je također koristan i za područja siromašna instrumentima, gdje se želi procijeniti gibanje tla zbog boljeg uvida i pristupa ugroženom području. U prije navedenim zemljama s razvijenim ShakeMap programskim paketom, informacije o potresu, tj. karte potresne opasnosti se automatski generiraju i objavljuju na internetskim stranicama već nekoliko minuta nakon potresa, a osim toga karte značajnijih potresa se prikazuju na televiziji kako bi novinarima pomogli u informiranju građana. Za procjenu gibanja tla na prostornoj mreži koriste se atenuacijske relacije, pa se izračunata gibanja kombiniraju sa zapisima s postaja, kako bi se izradile karte intenziteta potresanja. Kombinacijom procijenjenih i na postajama zabilježenih vrijednosti gibanja tla izrađuju se konturirane karte.

U svrhe planiranja i proučavanja rizika jako su korisne karte scenarija, koje predviđaju očekivani model štete za odabranu magnitudu i hipocentar potresa. Scenariji potresne opasnosti imaju primjenu u potresnom inženjerstvu, seizmološkim istraživanjima, planiranju hitne intervencije, analiziranju pouzdanosti gradske uprave, javnim informacijama i obrazovanju [2]. Kako nema scenarija koji može točno prikazati svaki detalj, scenariji potresne opasnosti su koristan regionalni model, koji pokazuje potencijalnu štetu i pruža bolje razumijevanje potresnih hazarda. Osim karata potresne opasnosti programski paket daje i karte koje prikazuju raspodjelu vršne brzine i ubrzanja te spektar odziva za tri perioda (0.3 , 1 , 3 s), a koji se osim za procjenu gubitaka i štete koriste za analize potresnog inženjerstva. Spektri odziva za određenu lokaciju odlični su za analizu utjecanja gibanja tla na određene vrste zgrada i struktura. U seizmološke svrhe karte su našle korisnu upotrebu za brzi pregled posljedica geološke strukture i rasjedanja.

2.1.1. Način rada ShakeMap programskog paketa

Primjena se zasniva na gustoj mreži instrumenata koncentriranih u urbanim sredinama s velikim seizmičkim hazardom te nekoliko stanica izvan tog područja. Očekuje se da potpuno razvijene karte, generirane na takvoj mreži, daju najtočniji uvid u područje s najvećim rizikom, gdje će pružanje pomoći biti hitno i kompleksno. Međutim, mnoga postrojenja i industrijske zone smještene su daleko od urbanih područja i ovih gustih instrumentalnih mreža, pa je potreban razvoj algoritama koji koristeći razne seizmološke

alate najbolje opisuju gibanje tla na udaljenim područjima. Procjena, koja pomaže pristupu situaciji, koristi se zbog takvih područja te zbog područja na kojima je moguć prekid komunikacijske mreže. Kada bi stanice bile postavljene na svakoj desetoj od tisuću točaka mreže tada bi kreiranje karata potresne opasnosti bili relativno jednostavno. Na žalost to nije moguće. U nekim su slučajevima točke mreže desecima kilometara udaljene od najbliže seizmološke stanice. U tom slučaju se kombiniraju informacije s pojedinih stanica, karakteristična amplifikacija i atenuacijske relacije za izradu najbolje odgovarajuće karte. Pretpostavljanje gibanja, gdje postoji samo nekoliko stanica, pa onda interpolacija podataka i procjena mreže za kartiranje i konturiranje zahtjeva nekoliko koraka. Prvi je kreiranje grube, ravnomjerno razgranate mreže stanica koristeći empirijske atenuacijske relacije koje ovise o magnitudi i udaljenosti. Točke ove mreže koriste se za procjenu gibanja tla u područjima udaljenim od stanica, kao da su zabilježene na uvjetima osnovne stijene. Ova procjena kombinira se s podacima sa stanica te se interpolira na skalarnoj mreži koja predstavlja gibanja u stijeni. Amplitude se tada skaliraju na osnovu uvjeta na lokaciji i na kraju se unose na kartu za izradu konačnog produkta.

2.1.2. Primjena u Hrvatskoj

U Nacionalnom institutu za geofiziku i vulkanologiju u Rimu instalirana je 3.1 verzija ShakeMap programskog paketa koja se za ovaj rad koristila [8]. Kao što je već rečeno, karte potresne opasnosti generiraju se korištenjem parametara vršnih gibanja i intenziteta potresa gdje se kombiniraju zabilježena gibanja tla sa seizmološkim i geološkim informacijama dostupnim za određena područja. U Italiji su karte potresne opasnosti automatizirane i prikazuju se na mrežnim stranicama gotovo nekoliko minuta nakon potresa. Daljnjim pristizanjem podataka iste se automatski nadograđuju. Trešnja je prikazana na kartama u obliku vršnih gibanja - vršne akceleracije, vršne brzine te spektra odziva akceleracije i instrumentalno izvedenog intenziteta. Za svrhe izrade gotovo trenutnih karata podaci se zapisuju uglavnom širokopojasnim digitalnim uređajima, seizmografima i akcelerografima. U Hrvatskoj je trenutno instalirano 39 digitalnih seizmografa (17 stalnih postaja Seizmološke službe (slika 1), 4 povremene postaje, 7 postaja u sklopu VELEBIT mreže te 11 AlpArray i AlpArray CASE postaja) [9]. S obzirom da programski paket u Hrvatskoj još nije instaliran ulazni podaci su uneseni i upravljani ručno. Uz seizmološke podatke potrebne za ispravnu interpolaciju, koriste se prethodno određene atenuacijske relacije za procjenu gibanja tla i lokalna amplifikacija bazirana na osnovi prosječne brzine S valova u gornjih 30 m (V_{s30}).



Slika 1. Mreža seizmoloških postaja RH u 2016. godini.

2.2. Relacije

2.2.1. Atenuacijske relacije

Za područja izvan dosega seizmičkih instrumenata, gibanja tla moraju se pretpostavljati koristeći dostupne parametre izvora potresa i atenuacijske relacije. Atenuacijske relacije su dostupne za širok spektar magnituda, žarišnih mehanizama i tektonskih postavki. Igraju važnu ulogu u kvalitetnoj izradi karata potresne opasnosti. Kako je Hrvatska podijeljena na 17 različitih seizmičkih zona, bilo bi idealno kada bi za svaku zonu koristili njoj najbolju odgovarajuću atenuacijsku relaciju. No, za ShakeMap programski paket razvijeni su i ponuđeni samo određeni modeli relacija [10] predviđeni za određena područja od kojih je samo jedan za Europu. Za potrebe ovog rada, bez obzira na regionalne različitosti seizmičke aktivnosti, korištena je predložena atenuacijska relacija, koju su izveli Akkar i Bommer [11]. Prilikom instaliranja programskog paketa u Hrvatskoj, bilo bi dobro izvesti nove atenuacijske relacije koje se zatim dodaju u listu. Neke od, za programski paket, prilagođenih atenuacijskih relacija prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Prilagođene atenuacijske relacije za ShakeMap programski paket

Ime	Referenca	Magnituda	Udaljenost	Metrička udaljenost	PGV	PSA	Vrsta nepouzdanosti	Regija
AB06_EN A_BC	Atkison i Boore (2006)	≥ 4.0	0 - 1000	R_{RUP}	Da	Da	Prostorno konst.	Sjeveroistočna Amerika
AkkaBommer	Akka i Bommer (2007, 2007b)	$5.0 \leq M \leq 7.6$	5 – 100	R_{RUP}	Da	Da	Prostorna konst.	Europa
Boatwright03	Boatwright i sur. (2003)	$3.5 \leq M \leq 7.1$	0 – 300	R_{HYPO}	Da	Ne	Prostorna konst.	Sjeverna Kalifornija
Garcia05	Garcia i sur. (2005)	$5.2 \leq M \leq 7.4$	0 – 400	R_{RUP}, R_{HYPO}	Da	Da	Prostorna konst.	Meksiko
Kanno2006	Kanno i sur. (2006)	≥ 5.5	0 – 500	R_{RUP}	Da	Da	Prostorna konst.	Subdukcija, aktivna tektonika
MA2005	Motazedian i Atkinson (2005)	$3.0 \leq M \leq 8.0$	2 – 500	R_{RUP}	Da	Da	Prostorna konst.	Puerto Rico
Youngs97 Youngs97_ interfaceYo ungs97_intr aslab	Youngs (1997)	$5.2 \leq M \leq 8.0$	0 – 300	R_{RUP}	N & H' 82	Da	Prostorna konst.	Subdukcija
Zhao06 Zhao06_cr ustalZhao0 6_interaceZ hao06_intra slab	Zhao i sur. (2006)	$5.0 \leq M \leq 8.3$	0 – 300	R_{RUP}	N & H' 82	Da	Prostorna konst.	Japan

2.2.2. Ostale relacije

Kao ulazne podatke za izradu karata potresne opasnosti moguće je koristiti i makroseizmičke intenzitete. Ti podaci mogu ispuniti praznine gdje nisu dostupni zapisi gibanja tla te često služe kao kontrola na područjima s malo stanica, kao i za povijesne potrese gdje su ograničeni makroseizmički intenziteti [6]. Amplitude gibanja tla mogu biti izvedene iz intenziteta koristeći odgovarajuće relacije za pretvaranje podataka (*Ground-Motion/Intensity Conversion Equation*). Osim ovih relacija programski paket koristi i prognostičke relacije za procjenu intenziteta, koje su manje dostupne, te usredotočene na aktivnu tektoniku. Za dopunjavanje dostupnih prognostičkih relacija intenziteta, treba razviti i „virtualnu prognostičku relaciju“ koja je kombinacija izabrane atenuacijske relacije i prognostičke relacije za pretvaranje gibanja tla u intenzitet, te one zajedno tvore izravne prognostičke relacije intenziteta. Kao i atenuacijske relacije, za ShakeMap programski paket su razvijene relacije za pretvaranje podataka koji se koriste za određena područja i potrese. Budući da razvijeni modeli odgovaraju samo za područje SAD-a i za Italiju, u radu se koristi model koji su razvili Worden i sur. [12], gdje se za Ameriku koristi Modified Mercalli

(MMI) ljestvica koja je jako slična Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) ljestvici koja se koristi u Hrvatskoj.

2.3. Prostorna korekcija

Kako su amplitude seizmičkih valova na osnovnoj stijeni manje od onih na rahlom, mekanom površinskom sloju, ovaj korak igra važnu ulogu pri izradi karata potresne opasnosti. Rastresiti, mekani slojevi sedimenata, odnosno depozita, na čvrstoj, osnovnoj stijeni mogu znatno povećati amplitudu seizmičkih valova odgovarajuće frekvencije na samoj površini i do nekoliko puta. Pri interpoliranju prostornih podataka na mrežu prvo se uklanjaju amplifikacijski utjecaji, zatim izvodi interpolacija na uniformnoj mreži te na kraju dodaju amplifikacijski uvjeti za svaku točku mreže, ovisno o njezinim karakteristikama. U praksi se prvo konvertiraju amplitude zabilježenih vršnih gibanja na osnovnu stijenu, pa se pomoću atenuacijskih relacija računaju amplitude za zamišljene točke mreže koja je bazirana na osnovnoj stijeni. Amplitude ovisne o amplifikacijskim faktorima se nadalje dodaju procjenama osnovne stijene koristeći geološku kartu te prosječne brzine S valova u gornjih 30 metara (V_{s30}). Amplifikacijski faktori su usvojeni iz Borchardt-ovih relacija [13]. Važno je napomenuti da je ova procedura prostorne korekcije uređena tako da vrati originalne, zabilježene podatke. Najvažniji parametar za proceduru prostorne korekcije je brzina širenja S valova u gornjih 30 metara (V_{s30}). Geološku klasifikaciju litologije za područje Hrvatske provedeno je na osnovu geološke karte Hrvatske [14] s mjerilom 1:300 000 (slika 2).



Slika 2. Geološka karta RH [4].

Ranije izračunate brzine V_{s30} u radu Stanko i sur. [15] poslužile su kao smjernice pri svrstavanju litoloških jedinica u geološku kategorizaciju prema Eurokodu 8 – EC8 (tablica 2). Određivalo se po nepisanom pravilu koje kaže da skoro sve stijene (karbonati, vapnenci, breče, itd.) u geološkoj kategorizaciji spadaju u kategoriju A prema EC8, vapnenačko-klastične naslage, tvrdi pješčenjaci, lapori, zbijeni šljunci, jako tvrde gline i slični „tvrđi“ materijali spadaju u B kategoriju, aluvijalni šljunci i pijesci u većini slučajeva su C kategorija, dok općenito debele naslage pijeska, slabe gline, prahovi spadaju u D kategoriju i većinom se nalaze na aluvijalnim područjima neposredno uz rijeke. Važno je napomenuti da je ovo samo gruba procjena, jer je bez bušotina i geofizičkih istraživanja teško precizno procijeniti EC8 kategoriju samo prema geološkoj karti. Za klasificiranu litologiju dodijeljene su sljedeće brzine: A = 1000, B = 600, C = 300, D = 150 i E = 250 m/s, koje su zatim usuglašene sa seizmotektonikom (prof. B. Tomljenović, osobno priopćenje). Osim za područje Hrvatske, geološka klasifikacija litologije napravljena je i za područje Bosne i Hercegovine, zbog uskog dijela južnog Jadrana gdje se epicentri nekih važnih potresa nalaze izvan Hrvatske granice. Treba naglasiti da za ovo područje nisu bili dostupni podaci o izmjeranim brzinama širenja S valova u gornjih 30 m (V_{s30}).

Tablica 2. Geološka klasifikacija i odgovarajuće V_{s30} vrijednosti [14].

Vrsta tla	Opis stratigrafskog profila	V_{s30} (m/s)
A	Stijene (karbonati, vapnenci, breče itd.)	1000
B	Vapnenačko-klastične naslage, tvrdi pješčenjaci, lapori, zbijeni šljunci, jako tvrde gline i slični „tvrđi“ materijali	600
C	Aluvijalni šljunci i pijesci	300
D	Debele naslage pijeska, slabe gline, prahovi	150
E	Površinski aluvijalni slojevi C ili D, 5-20 m debljine, koji se nalaze preko tvrdog materijala	250

3. Ulazni podaci

3.1. Prikupljanje i priprema podataka

Osnovni parametri za izradu karata potresne opasnosti su lokalna magnituda, koordinate epicentra potresa te opcionalno, intenzitet potresa. Svakako, da su za precizniju i točniju procjenu gibanja tla potrebni digitalni zapisi iz kojih se očitavaju vršne vrijednost potrebne za kreiranje karata. ShakeMap sustav je samostalni programski paket koji je pasivni potrošač seizmoloških podataka, drugim riječima, programski paket sam po sebi ne sadrži nikakve podatkovne komponente. Pretpostavlja se da su za automatsko generiranje karata, dostavljeni podaci okidač koji pokreće ShakeMap programski paket za značajnije potrese u području seizmološke mreže [2]. Svaka stanica mora imati samostalne metapodatke. Nekoliko minuta nakon potresa automatski izrađene karte su dostupne za javnost i znanstvenu upotrebu putem mrežnih stranica, a prikupljanjem novih, naknadno pristiglih podataka iste se automatski nadograđuju. Za izradu svih ovih karata koriste se zabilježene vršne - maksimalne vrijednost zabilježene na dvije horizontalne komponente gibanja. Važno je naglasiti da amplitude uvijek trebaju biti pozitivne vrijednosti bez obzira na smjer vršnog gibanja. Za potrese male magnitude, spektralne vrijednosti mogu imati velik šum, pa operateri često izostavljaju izradu karata spektralnog odziva ispod određenog praga ($M = 4$).

Svi ulazni podaci: informacije o potresu, amplitude gibanja tla i intenzitet, moraju biti u obliku XML (*Extended Markup Language*) datoteka. Kad se ulazni podaci učitaju i zapišu odgovarajuće vršne amplitude za svaku postaju, izvode se intenziteti iz vršnih amplituda i obrnuto, koristeći odabrane relacije za pretvorbu. Male vrijednosti intenziteta se ne pretvaraju u vršna gibanja jer su značajan izvor pogrešaka u interpolaciji.

3.2. Podaci s hrvatskih seizmoloških postaja

Podatci za kreiranje karata i scenarija potresne opasnosti dobiveni su iz državne mreže seizmoloških postaja, te su dopunjeni podacima privremenih postaja u Hrvatskoj i postaja susjednih zemalja. Za svaki potres dobiveni su zapisi seizmografa u GCF formatu sa svih postaja te podaci koji su se sastojali od pet parametara: vrijeme nastanka potresa, koordinate epicentra, žarišne dubine i lokalne magnitude. Osim toga, za neke su potrese bili dostupni i podaci o intenzitetu u epicentru makroseizmičke Mercalli-Cancani-Siebergove (MCS) ljestvice te opaženi intenziteti u mjestima oko samog događaja.

3.3. Obrada seizmograma

Obrada seizmograma za analizu rađena je u sljedećih 6 koraka:

1. Dobiveni podaci pretvoreni su iz GCF u SAC (Seismic Analysis Code) format pomoću programa 'gcf2sac'. Tako spremljeni podaci korišteni su za daljnju analizu;
2. Potresi čiji su zapisi bili dvosatni, spajani su u jedan zapis;
3. Preimenovanje datoteka iz razloga što svi ulazni podaci moraju imati univerzalni zapis, npr. naziv datoteke s postaje Hvar bio je u obliku: „hva__20030329_1700_e20“, a kada je preimenovan izgledao je: „2003.88.17.00.00.00.CR.hva..BHE.D.SAC“;
4. Budući da su zapisi bili (dvo)satni potrebno je bilo izdvojiti samo dio zapisa koji se odnosi na potres;

(Za zadnja tri koraka korištene su skripte koje je napisao kolega Dario Jozinović za prilagodbu hrvatskih podataka univerzalnom ulaznom obliku podataka).

5. Prilagođavanje podataka zadanog potresa za potrebe programskog paketa;
6. Računanje vršnih brzina i ubrzanja, te spremanje dobivenih vrijednosti u XML datoteke pogodne za ShakeMap.

Također, ručno su uneseni makroseizmički podaci kao skripte u zadanom XML formatu, koje sadrže dostupne podatke o intenzitetu, lokaciji, izvoru i vrsti zapisa. Osim toga uređene su i skripte o samom događaju. One sadrže podatke o identitetu potresa, koordinatama epicentra, magnitudi, vremenu nastanka, žarišnoj dubini, imenu lokacije i vremenu kreiranja karata. Ovi podaci se nalaze u zaglavlju kreirane karte. Kada su podaci spremni, pokretanje skripte za izradu karata je jednostavno.

4. Scenariji potresa

Planiranje i koordiniranje hitne intervencije, vlasti, lokalne uprave i drugih organizacija najbolje se provodi na realnim potresnim događajima s kojima se najvjerojatnije možemo suočiti. Iz tog razloga definira se scenarij potresa koji zadovoljava ovu potrebu. Scenariji predstavljaju realizaciju mogućeg rasjedanja pretpostavljanjem određene magnitude, lokacije i geometrije rasjedne zone te određivanje potresanja koristeći razne strategije. Karte scenarija korisne su za ispitivanje izlaganja struktura, komunalija i cjevovoda pri posebnim potencijalnim potresima, a njihov temeljni cilj je priprema i trening kako bi bili spremni za rijetke, ali razarajuće potrese pri kojima su važne ispravne i pravovremene reakcije [2].

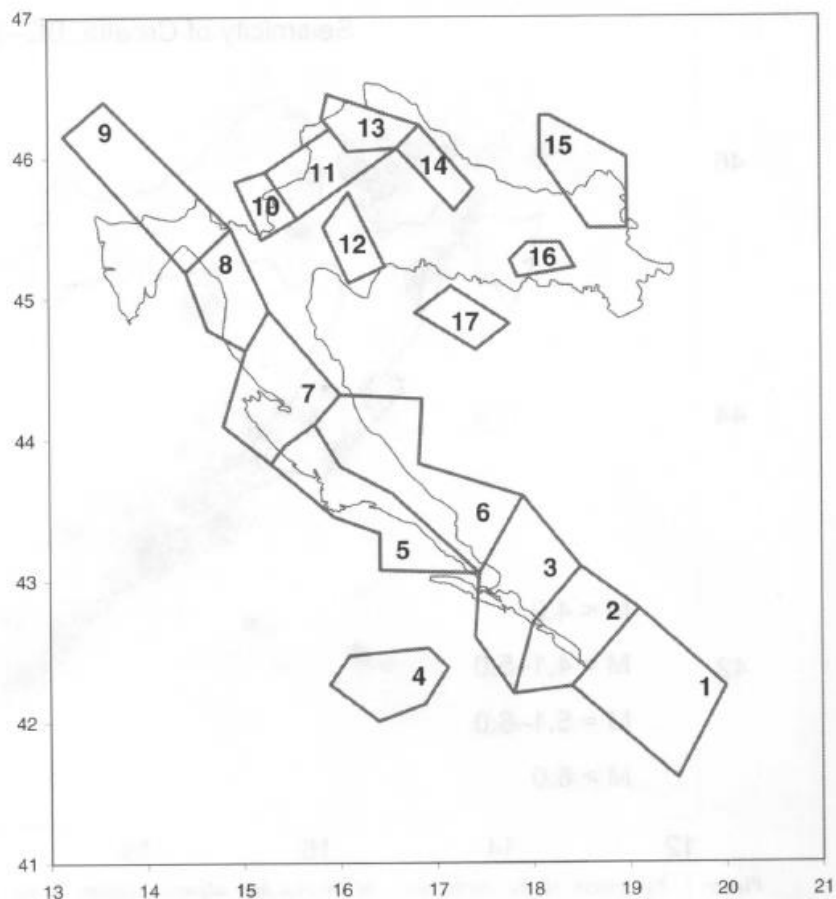
Karte scenarija su zapravo karte potresne opasnosti s pretpostavljenim parametrima magnitude, epicentra i opcionalno, rasjednog segmenta koji se može aktivirati ili je već prije bio aktivan. Programski paket se pokreće na isti način kao pri generiranju karata potresne opasnosti realnih potresa te on može procijeniti gibanje tla na području koje okružuje rasjed i dati rezultate kao da je događaj realni potres. Koristi se atenuacijskim relacijama za procjenu vršnih gibanja na osnovnoj stijeni. Nakon toga se radi korekcija amplitude na lokalnim dijelovima tla, kao što se radi i u interpolacijskoj shemi karata potresne opasnosti realnih potresa. Ovaj pristup je jednostavan i aproksimativan. Generalno prikazuje prosječan utjecaj, zato što je teško objasniti pojedini odabir epicentra ili prikazati rezultate za sve moguće epicentralne lokacije. Debljina rasjedne zone je eksplicitno uključena, a dubina rasjeda može biti postavljena. U većini slučajeva ne uzima se u obzir smjer rasjedanja, niti se pomoću njega modificiraju vršna gibanja [10].

Ako koristimo pristup koji uključuje opis rasjedne geometrije, lokacija epicentra neće utjecati na resultantno potresanje [2]. Utječu samo lokacija i dimenzije rasjeda. Kada bi izračunima dodali i smjer pružanja rasjeda tada bi različite hipocentralne lokacije značajno utjecale za istu magnitudu i rasjedni segment potresa. Ovaj empirički pristup daje samo prosječne vrijednosti vršnih gibanja. Pri kreiranju ovakvih potresa s pretpostavljenim parametrima, karte imaju drugačiju identifikacijsku oznaku kako se ne bi pomiješale sa stvarnim potresima i nalaze se u odvojenom direktoriju pri automatskom generiranju i objavljivanju. Kako su identične kartama potresne opasnosti realnih događaja, karte scenarija su preko cijele površine označene riječju „scenario“ kako bi se izbjegla eventualna mogućnost zamjene. Na kraju treba naglasiti da scenariji potresne opasnosti nisu predviđanja

potresa. Zapravo, nitko ne zna kada će, gdje i kako snažan potres biti. Ovim načinom se samo pretpostavlja magnituda i lokacija epicentra budućeg potresa za koji se mogu napraviti razumna predviđanja njegovog djelovanja, naročito način potresanja tla.

5. Rezultati i diskusija

Unutar sjeverozapadnog i jugozapadnog područja Hrvatske napravljena je podjela po seizmičkim zonama prema radu Markušić i Herak (1998), koji su predložili da se Hrvatska i susjedni teritorij podijele na 17 seizmičkih zona [5] (slika 3). U ovom radu izrađene su karte potresne opasnosti za 12 od 17 seizmičkih zona na području Hrvatske. Prvi kriterij odabira potresa bio je njihova lokacija (epicentar u ili blizu neke od obrađenih seizmičkih zona), dok se drugi odnosio na magnitudu. Birani su potresi s najvećom magnitudom nakon 2002. godine, za koje postoje digitalni zapisi, kako bi izrađene karte bile što konstruktivnije i zanimljivije. Svi obrađeni potresi imaju magnitudu veću od $M = 3.2$. Ukupno je obrađeno 17 potresa, od kojih se većina nalazi na seizmički najaktivnijem, obalnom dijelu Hrvatske. Rezultati su prikazani prema seizmičkim zonama, idući od samog juga Hrvatske prema sjevernom području. Također, izrađene su i karte scenarija za povijesne potrese koji su seizmički važni za Hrvatsku. Ukupno je prikazano 6 karti scenarija počevši od Velikog Dubrovačkog potresa 1667. godine, pa sve do 1996. godine kada je potres pogodio područje Ston-Slano.



Slika 3. Seizmičke zone Hrvatske (preuzeto iz Markušić i Herak (1998) [5]).

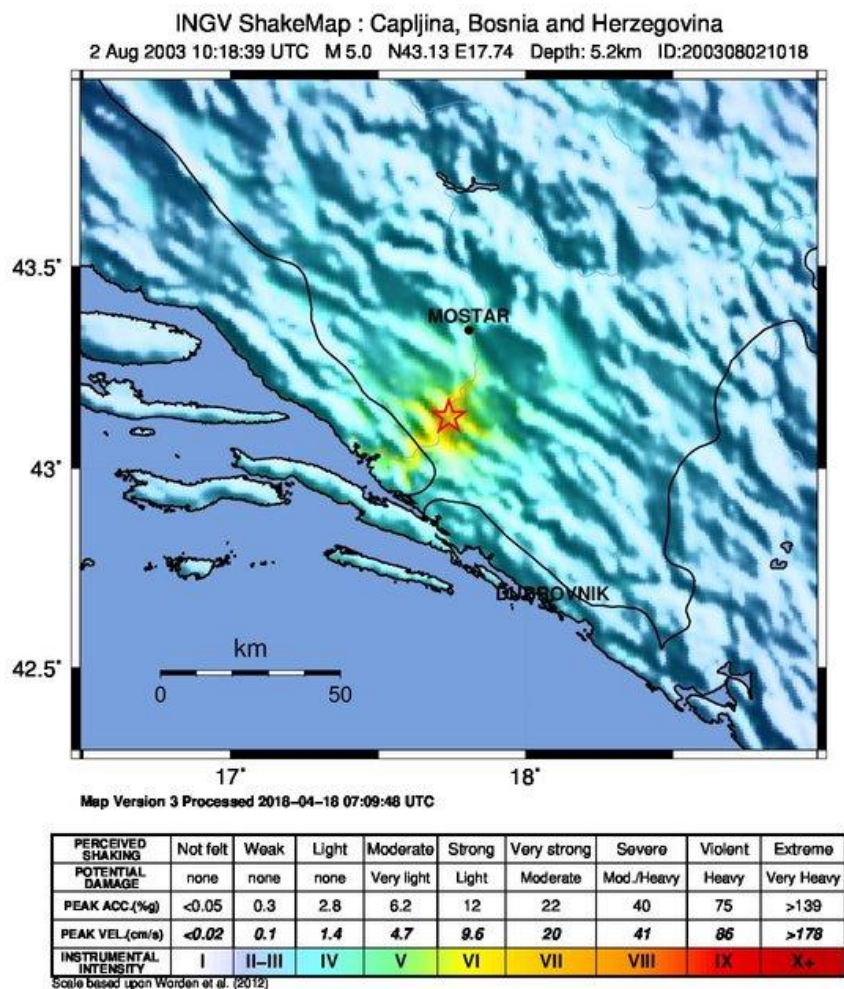
5.1. Seizmičke zone obalne Hrvatske

Seizmički najaktivnije područje zbog velikog broja potresa zasigurno se nalazi na istočnoj obali Jadranskog mora čemu je osnovni uzrok podvlačenje Jadranske mikroploče pod Vanjske Dinaride. Područje koje još od davnine bilježi značajne potrese, kao što su desetci snažnih potresa kod Dubrovnika, kroz 15. 16. i 17. stoljeće s intenzitetom u epicentru IX-X° Mercalli-Cancani-Siebergove (MCS) ljestvice [16], snažni potresi na području Stona, Imotskog i Makarske gdje se trese i danas, ne u tolikoj mjeri kao prije, ali po brojnosti i učestalosti ovo područje često podrhtava.

Ston-Metković zona (SZ3)

U ovoj zoni izrađena je i na slici 4 prikazana karta seizmičke opasnosti za potres s epicentrom u blizini Čapljine u Bosni i Hercegovini. Radi se o potresu koji se dogodio 2. kolovoza 2003., magnitude $M = 5.0$ i žarišne dubine 5.2 km. Uočavamo kako intenzitet potresa nije isti za okolno područje epicentra, već se on pruža jugozapadno prema Jadranu,

dolinom rijeke Neretve. Jasno je, da će svaki seizmolog intuitivno očekivati veću štetu u ovom području, ali važno je naglasiti kako primjenom ShakeMap programskog paketa dobivamo prihvatljive rezultate kakve bi u ovom slučaju i očekivali.

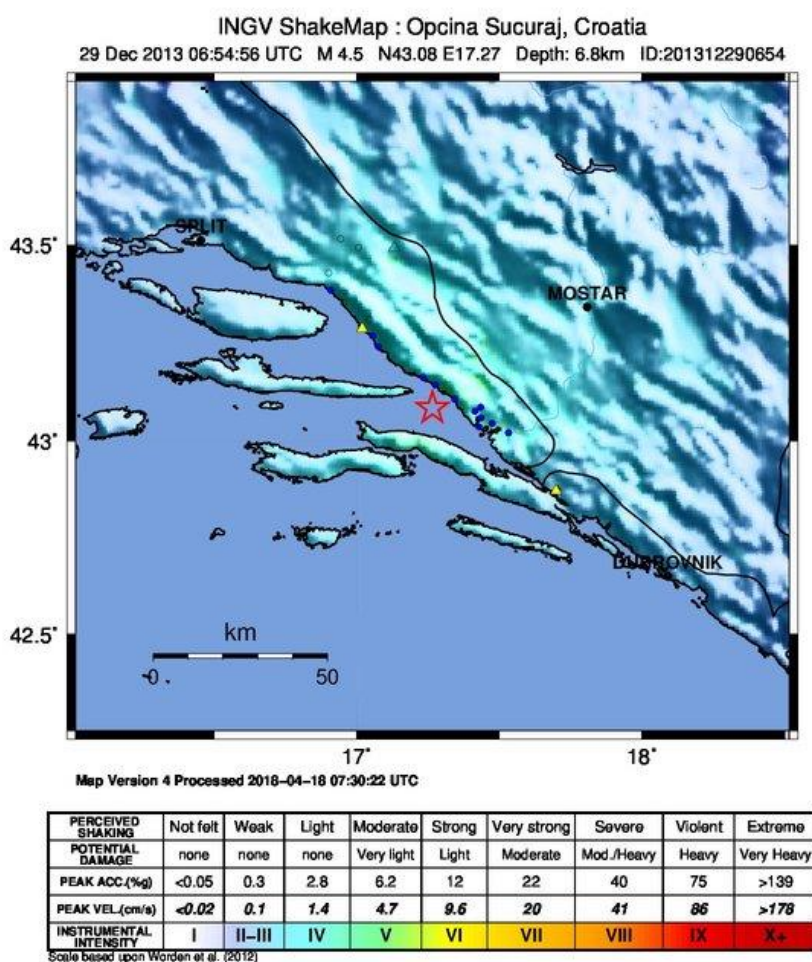


Slika 4. Karta potresne opasnosti za potres s epicentrom oko Čapljine, BiH, iz 2003. godine.

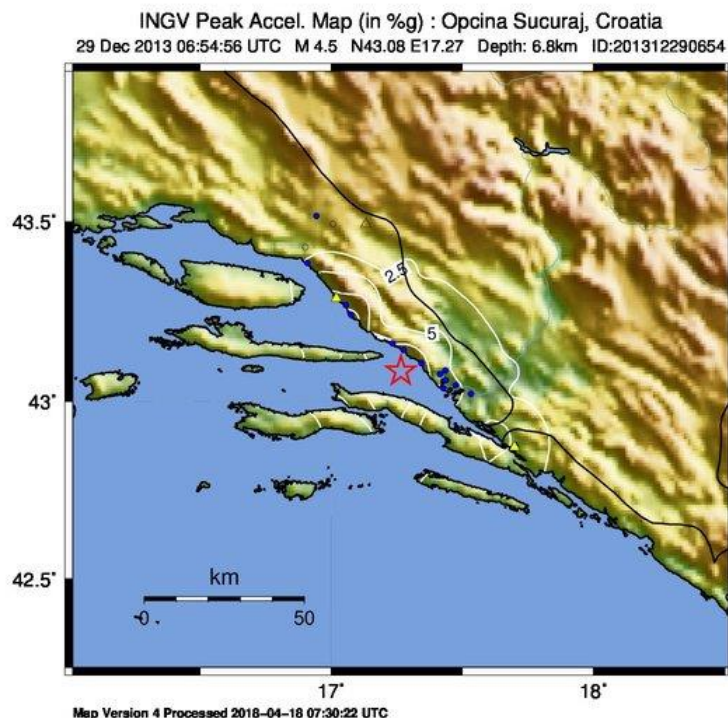
Karta potresne opasnosti prikazuje kritični opseg ugroženog područja, područja koja su potencijalno najviše pogođena i omogućuje brzu procjenu gubitaka. Crvena zvjezdica označava epicentar potresa. Na karti su ucrtani veći gradovi, kontinentalne i državne granice. Intenzitet je prikazan Modified Mercalli Intensity (MMI) ljestvicom [6] za koju možemo reći, kao što je već navedeno, da ima dobra preklapanja s Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) ljestvicom korištenom u Hrvatskoj [17]. U zaglavlju izrađene karte nalaze se informacije o vremenu, magnitudi, koordinatama epicentra, žarišnoj dubini i samom vremenu izrade karte. Iznad tih informacija unesen je naziv epicentralne lokacije.

Dalmacija (SZ5)

Ovo područje zauzima veći dio srednje Jadranske obale, gdje se potresi uglavnom pojavljuju u južnom dijelu Trst-Dugi otok rasjeda i na Mosor-Biokovo rasjednoj zoni [5]. Na slici 5 prikazana je karta intenziteta izvedena iz zabilježenih podataka za potres koji se dogodio 29. prosinca 2013. magnitude $M = 4.5$. Prilikom izrade ove karte uzeti su u obzir opaženi makroseizmički intenziteti na mjestima koja su prikazana plavim kružićima i nalaze se u blizini samog epicentra (zvjezdica). Karta prikazuje preciznu razdiobu intenziteta potresa zbog svih ulaznih podataka, što potvrđuje podudaranje karte i zapisa da se potres intenziteta IV – V °MCS osjetio u području Makarske, Vrgorca i Hvara. Uočavaju se i žuti trokutići koji označavaju obližnje seizmičke postaje.

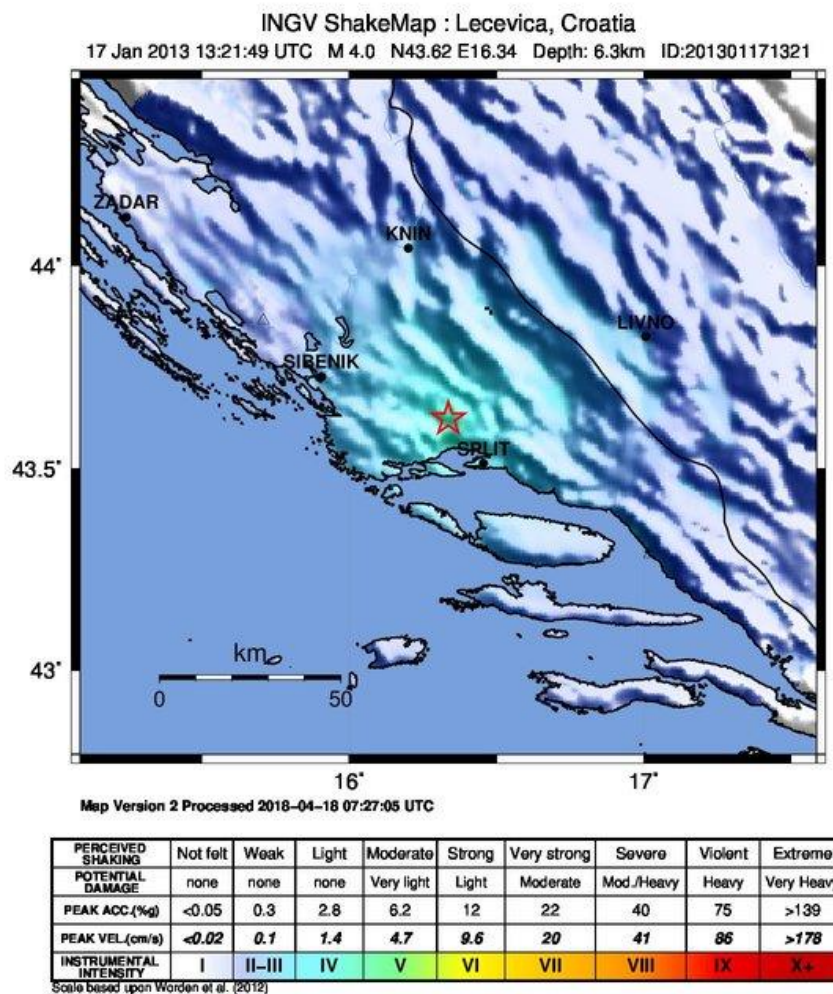


Slika 5. Karta potresne opasnosti za potres s epicentrom u blizini Makarske, iz 2013. godine.



Slika 6. Karta vršne akceleracije za potres s epicentrom u blizini Makarske, iz 2013. godine.

Osim karte intenziteta, na slici 6 prikazana je karta vršne horizontalne akceleracije (PGA), koja je na svakoj postaji konturirana u jedinicama postotaka i nešto je viša od 5 cm/s^2 . Vršne vrijednosti vertikalnih komponenti se ne koriste u konstrukciji karata zbog regresijskih relacija koje se temelje na horizontalnim vršnim vrijednostima [2]. Debljina između izolinija je promjenjiva i temelji se na maksimalno zabilježenoj vrijednosti preko mreže za svaki potres. Za srednje do velike potrese, model vršne akceleracije je često kompliciran s ekstremnim promjenama na udaljenosti od nekoliko kilometara. Uzrok su geološke razlike malih razmjera koje se nalaze u blizini mjesta koja značajno mogu promijeniti amplitudu visokofrekventnih ubrzanja i karakter valnog oblika. Unatoč tome, model vršnih ubrzanja često odražava ono što se osjetilo od niže razine potresanja do više razine oštećenja.



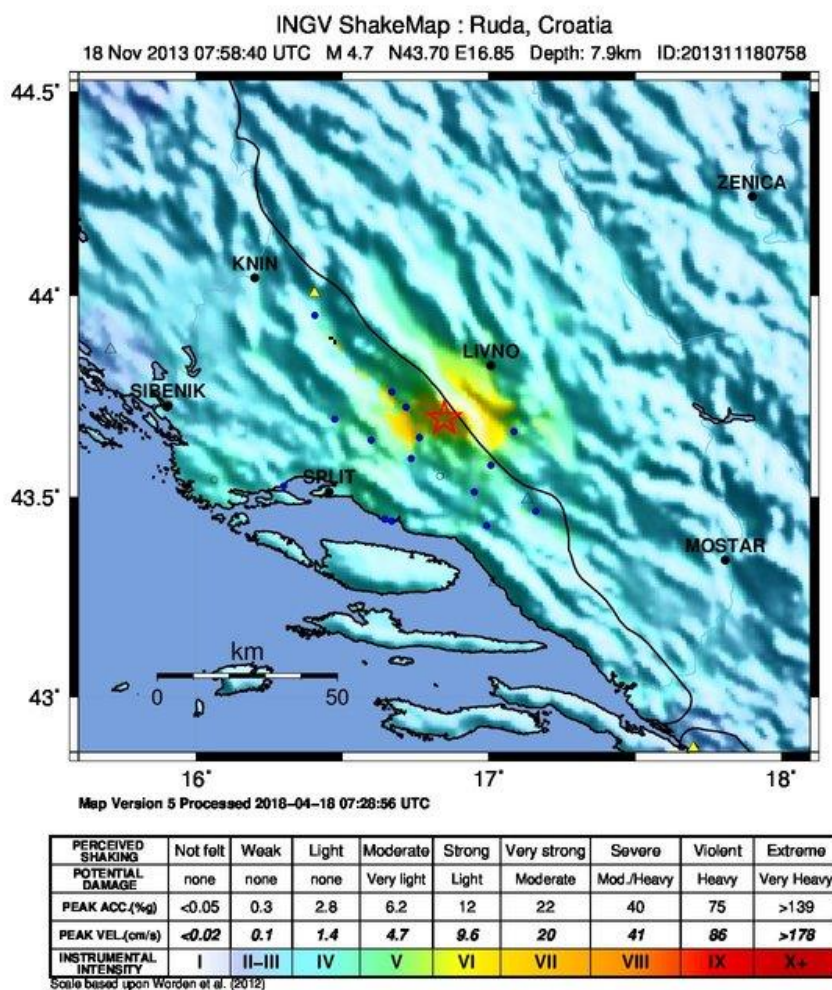
Slika 7. Karta potresne opasnosti za potres s epicentrom u blizini Splita, iz 2013. godine.

Na slici 7 prikazana je karta potresne opasnosti potresa koji se dogodio 17. siječnja 2013. godine s epicentrom sjeverno od Splita. Za ova potres nije bilo podataka o makroseizmičkim intenzitetima. Možemo pretpostaviti da su modelirane vrijednosti podcijenjene jer je iz evidencije Seizmološke službe (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a) vidljivo da je intenzitet u epicentru bio oko V-VI° MCS.

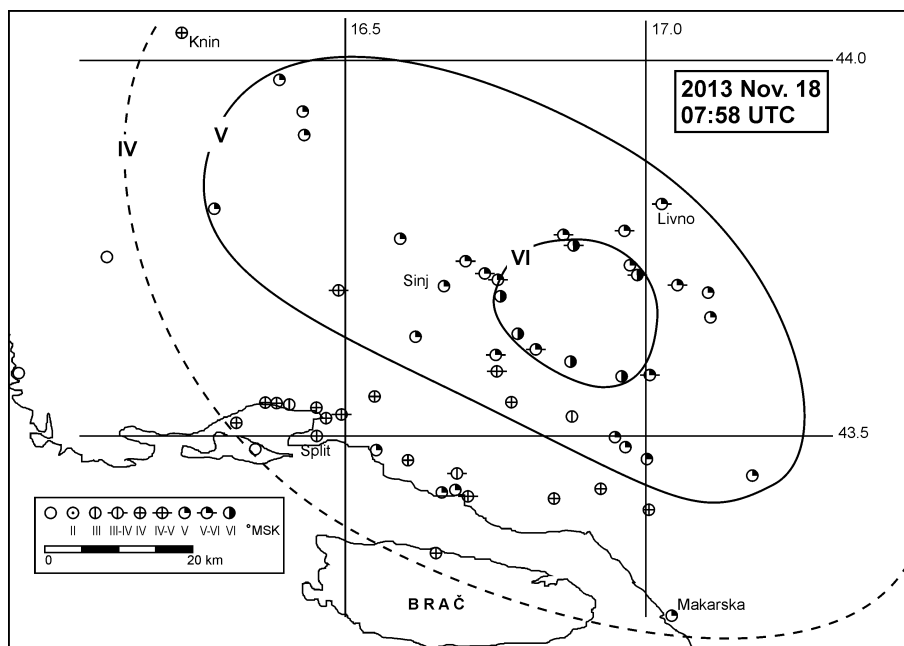
Dinara (SZ6)

Ovo područje je seizmički najaktivnije ako se uzme u obzir broj potresa. Zadnja tri desetljeća karakterizirana su pojavom brojnih potresa čija magnituda nije prelazila $M = 5.6$. Stoga su izrađene tri karte za koje su bili dostupni makroseizmički podatci na mjestima koja su prikazana plavim točkicama. Epicentri dvaju potresa se nalaze u Bosni i Hercegovini, ali imaju znatan utjecaj na hrvatsko područje. Prvi od njih se dogodio 18. studenoga 2013.

godine na graničnom području Hrvatske i BiH, oko 15-ak km južno od Livna i oko 40 km od Splita. Njegova magnituda iznosila je $M = 4.7$. Potres je bio na dubini 7.9 km, a u Hrvatskoj se osjetio diljem Dalmacije, u okolici Sinja, Splita, Hvara i Metkovića. Za dani potres prikazana je karta modeliranog intenziteta (slika 8) te za usporedbu, karta izoseista opaženih makroseizmičkih intenziteta (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a) (slika 9).



Slika 8. Karta potresne opasnosti za potres s epicentrom u blizini Sinja, iz 2013. godine.

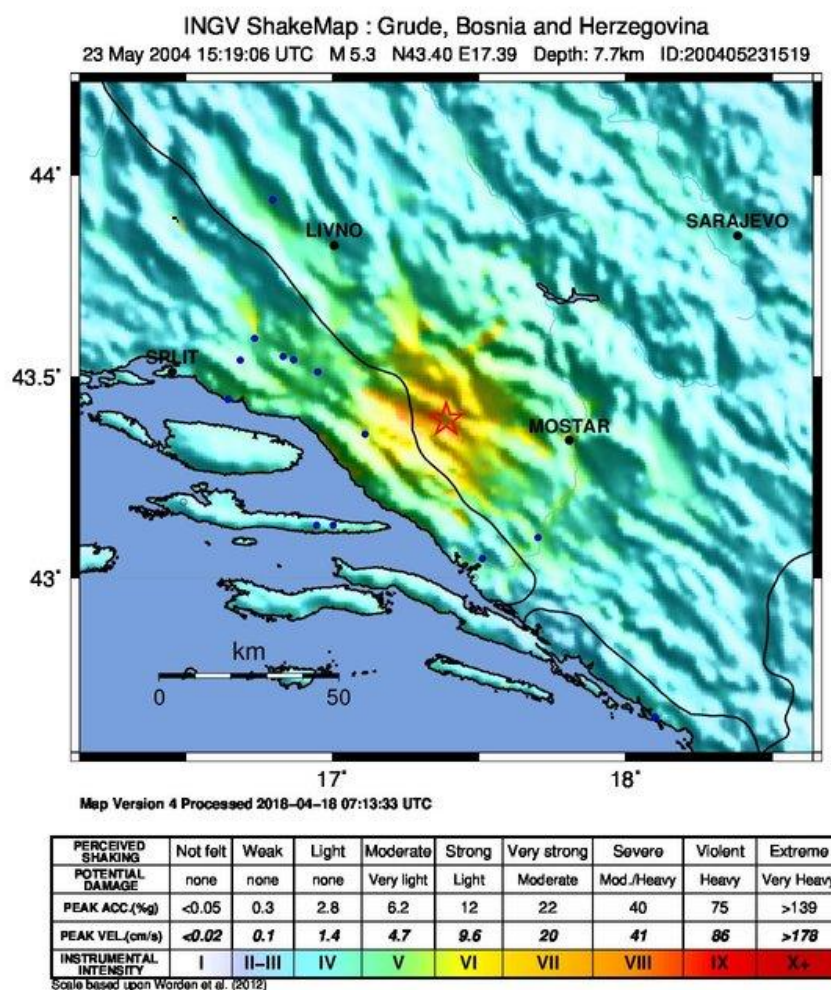


Slika 9. Karta izoseista opaženih makroseizmičkih intenziteta s epicentrom u blizini Sinja (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a).

Usporedimo li kartu izračunatih intenziteta kreiranu ShakeMap programom s kartom izoseista opaženih intenziteta vidimo jako dobro podudaranje. Mjerilo karata nije isto no, najvažnije se može zaključiti, obje karte pokazuju približno jednako područje najvećeg intenziteta (VI). Moglo bi se naslutiti da se epicentar nalazi na nekom uzvišenijem, nenaseljenom dijelu dok su okolni dijelovi, zahvaćeni višim intenzitetom, niže nadmorske visine i naseljeniji.

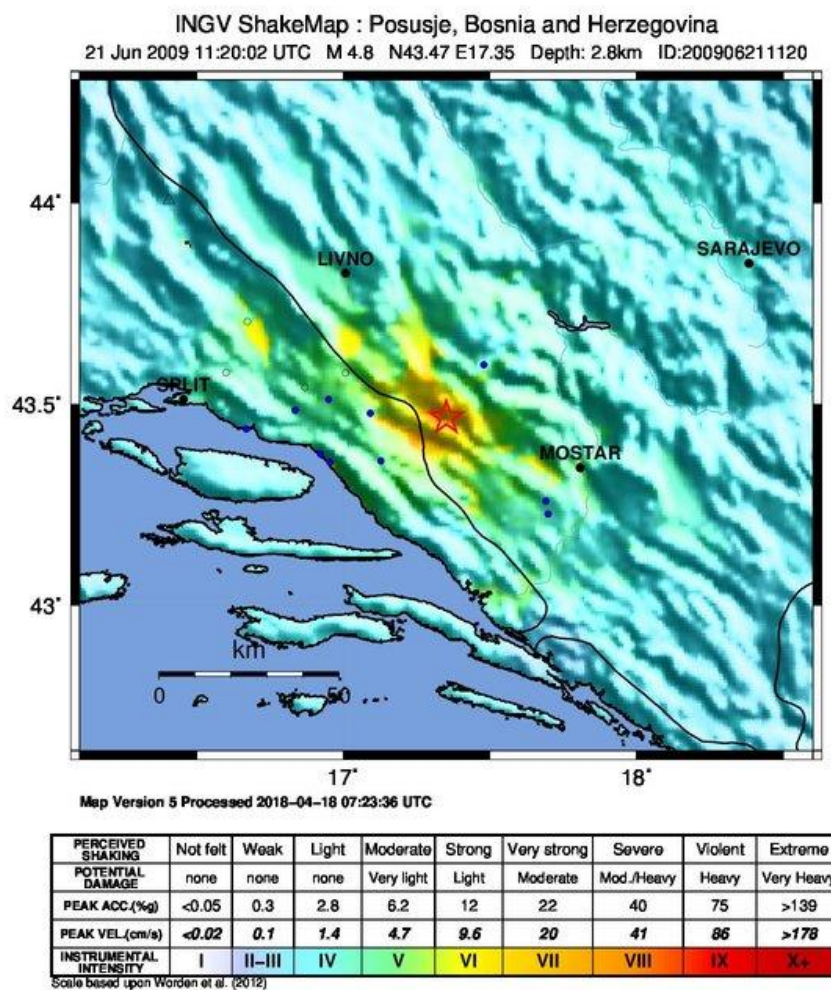
Sljedeći je potres s epicentrom u okolici Gruda u Bosni i Hercegovini. Potres magnitude $M = 5.3$ dogodio se 23. svibnja 2004. godine (slika 10). Iako je bilo mnogo više podataka o makroseizmičkim podacima intenzitetima, na karti nisu prikazani svi (plave točkice koje označavaju mjesta zabilježenog intenziteta), ali je sam program uzeo u obzir ove vrijednosti pri izradi karte. Maksimalni opaženi intenzitet iznosi VI °MCS dok na karti, sjeverozapadno od epicentra, možemo uočiti da je on nešto viši – VII °MMI što može biti rezultat npr. različite makroseizmičke ljestvice ili pak odabir prognostičkih relacija, no s druge strane karta možda predstavlja točnu raspodjelu intenziteta zbog nedovoljne naseljenosti tog područja što smanjuje točnost opaženih vrijednosti intenziteta. Na karti se uočava opseg područja oko epicentra s najvećim intenzitetom, dolina rijeke Neretve s intenzitetom V – VI °MMI, a na udaljenosti oko 60 km od epicentra, između Splita i Livna

područje s intenzitetom od VI °MMI, što je odličan pokazatelj gdje treba usmjeriti pomoć nakon potresanja.



Slika 10. Karta izračunatog intenziteta za potres s epicentrom kod Gruda, BiH, iz 2004. godine.

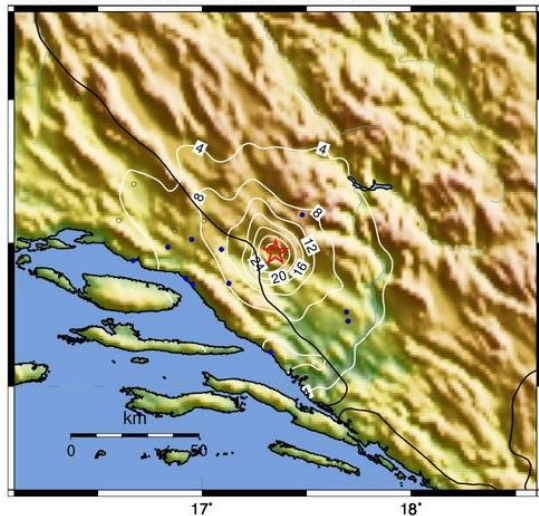
Treći potres, epicentra 5 km jugozapadno od Posušja, magnitude $M = 4.8$ dogodio se 21. lipnja 2009. godine, za njega su osim karata izračunatog intenziteta prikazane i karte vršne akceleracije, vršne brzine te karte spektralnog odziva za periode 0.3, 1 i 3 s. Spektar odziva pokazuje odgovor prigušenog oscilatora s jednim stupnjem slobode na zabilježeno gibanje tla. Ova reprezentacija podataka je važna za inženjerstvo kao pokazatelj kako će trešnja djelovati na građevinske strukture. Prema karti prikazanoj na slici 11 maksimalni intenzitet iznosi VII °MMI ljestvice što je opet precijenjena vrijednost u odnosu na opaženi makroseizmički intenzitet koji ne prelazi VI °MCS. Prema ovoj karti potres intenziteta II - III °MMI osjetio se i u 100 km udaljenom Sarajevu.



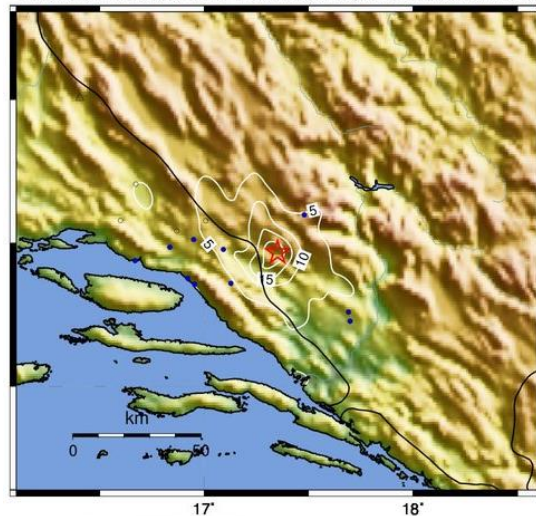
Slika 11. Karta izračunatog intenziteta za potres s epicentrom kod Posušja, BiH, iz 2009. godine.

Slika 12 prikazuje izolinije vršnog ubrzanja (lijevo) odnosno vršne brzine (desno) u cm/s na svakoj postaji. Zbog geološke strukture i amplifikacije izolinije nisu koncentrične kružnice. Najveće ubrzanje zabilježeno kod Posušja iznosi 54 cm/s^2 , dok je brzina 12 cm/s . Model vršnih brzina odražava model geometrije rasjedanja potresa s najvećom amplitudom u području izvora i u smjeru rasjedanja. Razlike između osnovne stijene i tla se pojavljuju, no cjelokupni model je jednostavniji od modela vršnih ubrzanja. Velike štete i štete na pokretnim strukturama se najbolje povezuju s brzinom tla. Napomenimo da je najveća brzina tla ikad zabilježena na Rinaldi postaji, za potresa u Northridge (čtvrta u Los Angelesu) 1994. godine, te je iznosila 183 cm/s [18].

INGV Peak Accel. Map (in %g) : Posusje, Bosnia and Herzegovina
21 Jun 2009 11:20:02 UTC M 4.8 N43.47 E17.35 Depth: 2.8km ID:200906211120

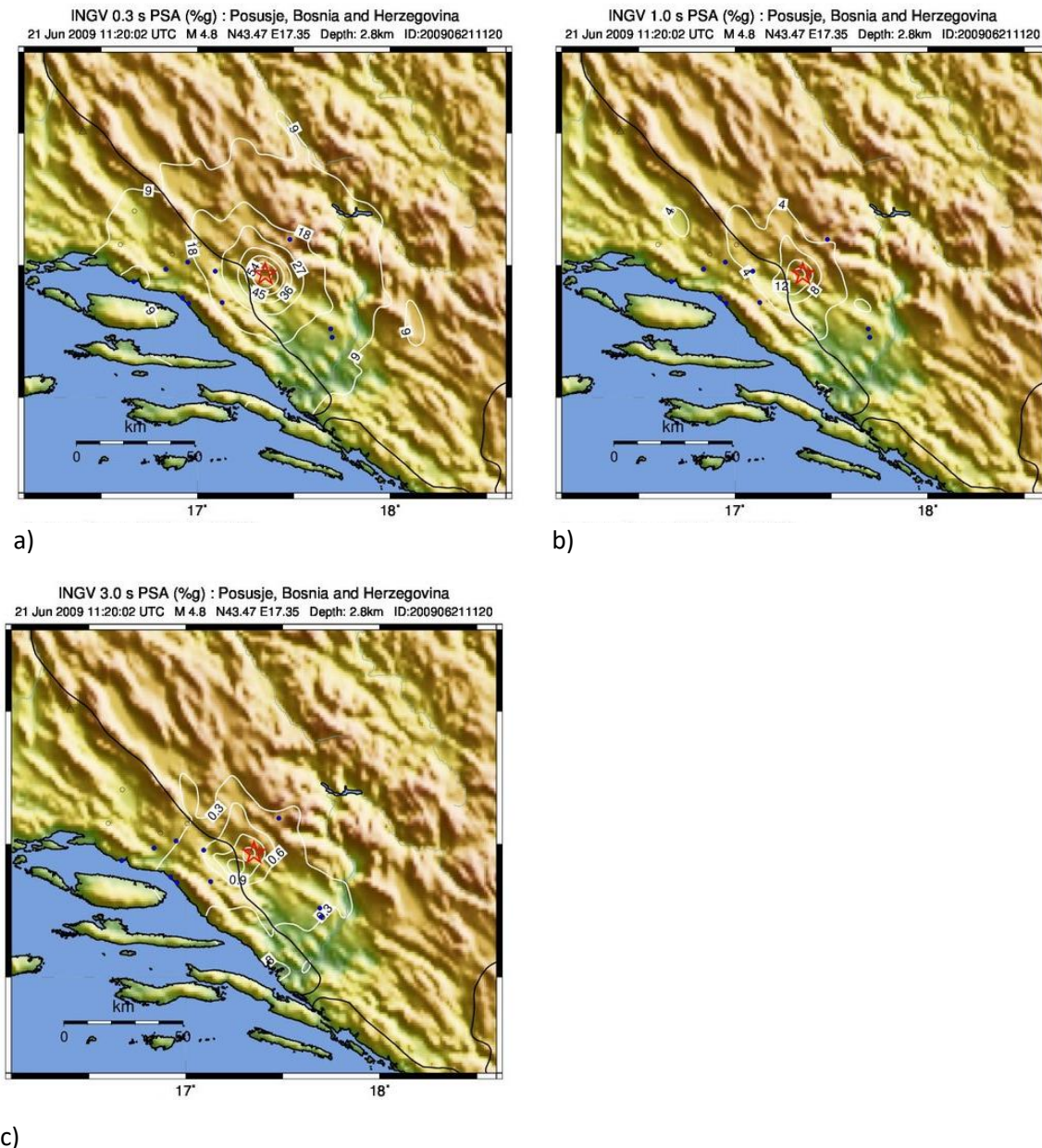


INGV Peak Velocity Map (in cm/s) : Posusje, Bosnia and Herzegovina
21 Jun 2009 11:20:02 UTC M 4.8 N43.47 E17.35 Depth: 2.8km ID:200906211120



Slika 12. Karte vršnog ubrzanja (lijevo) i vršne brzine (desno) za potres s epicentrom kod Posušja, BiH.

Na slici 13 prikazane su izolinije spektra ubrzanja za periode; 0.3, 1 i 3 s. Uočava se da je za period od 0.3 s maksimalno spektralno ubrzanje 54 cm/s^2 , za period od 1 s maksimalno ubrzanje je 12 cm/s^2 te 0.9 cm/s^2 za period od 3 s. Na ovim kartama su također prikazane plave točkice koje označavaju mjesta opaženih makroseizmičkih intenziteta.

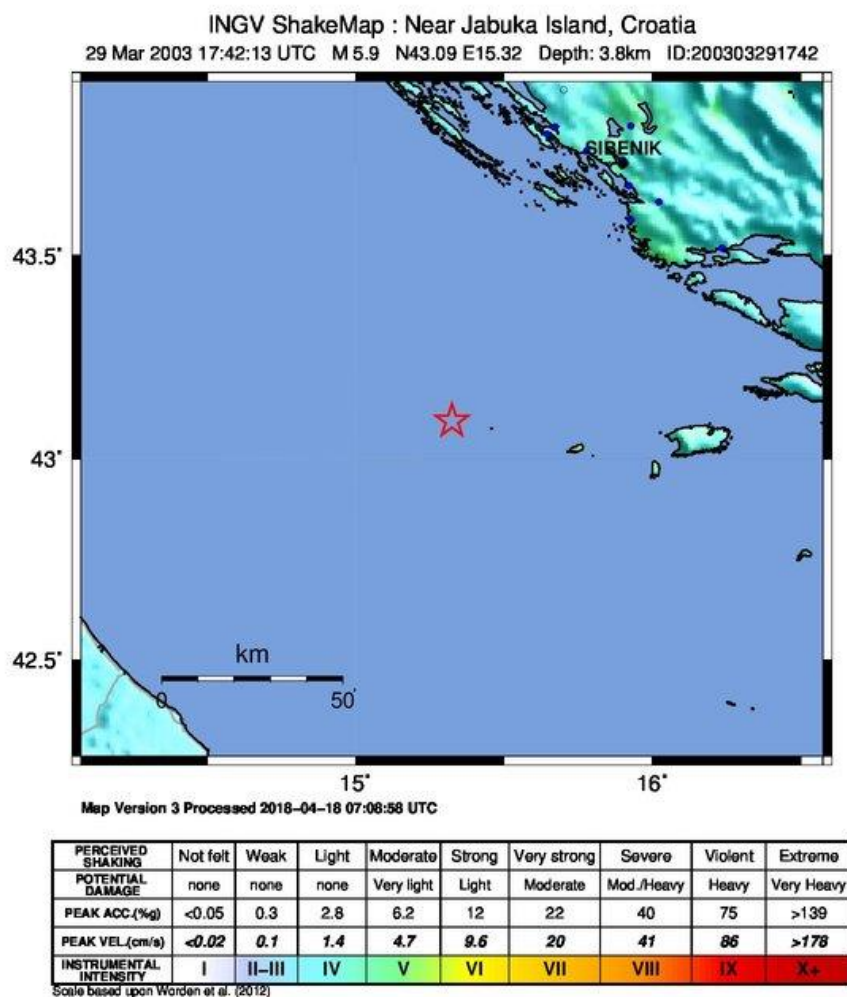


Slika 13. Karte spektra odziva za; a) 0.3 s, b) 1 s i c) 3 s za potres s epicentrom kod Posušja, BiH.

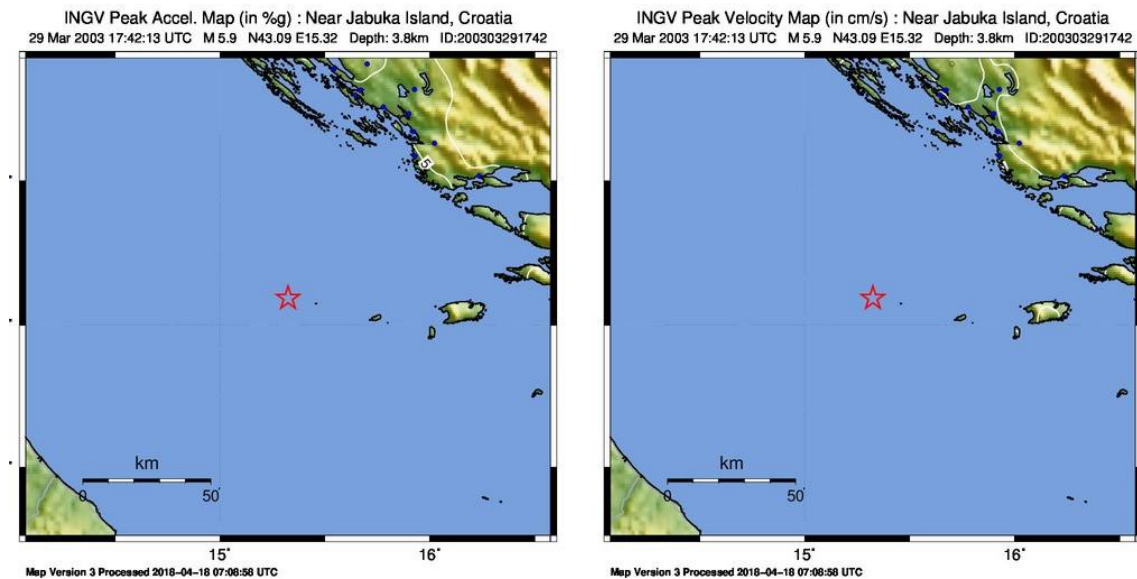
Južni Jadran (SZ4)

Iako podmorje Jadrana broji najsnažnije digitalno zabilježene potrese, na prikazanoj karti potresne opasnosti (slika 14) za potres koji se dogodio 29. ožujka 2003. magnitude $M = 5.9$, žarišne dubine 3.8 km, vidi se blagi utjecaj (intenzitet V° MMI) i na kopneno područje oko Šibenika koje je približno 80 km udaljeno od epicentra. Tu su unesene vrijednosti opaženih makroseizmičkih intenziteta koji su prikazani plavim točkicama. Prema karti maksimalni intenzitet na kopnenom području iznosio je V° MMI ljestvice što je točno

prema Arhivu Geofizičkog odsjeka PMF-a. Osim toga, na slici 15 prikazane su karte vršnog ubrzanja (lijevo) i vršne brzine (desno) na zahvaćenom području kao posljedica potresa u podmorju. Najveće očekivano ubrzanje je 5cm/s^2 . Budući da je epicentar dovoljno daleko od kopna, karte pokazuju male posljedice no daju točan uvid gdje bi se trebala usmjeriti prva pomoć ukoliko je potres bio snažniji.



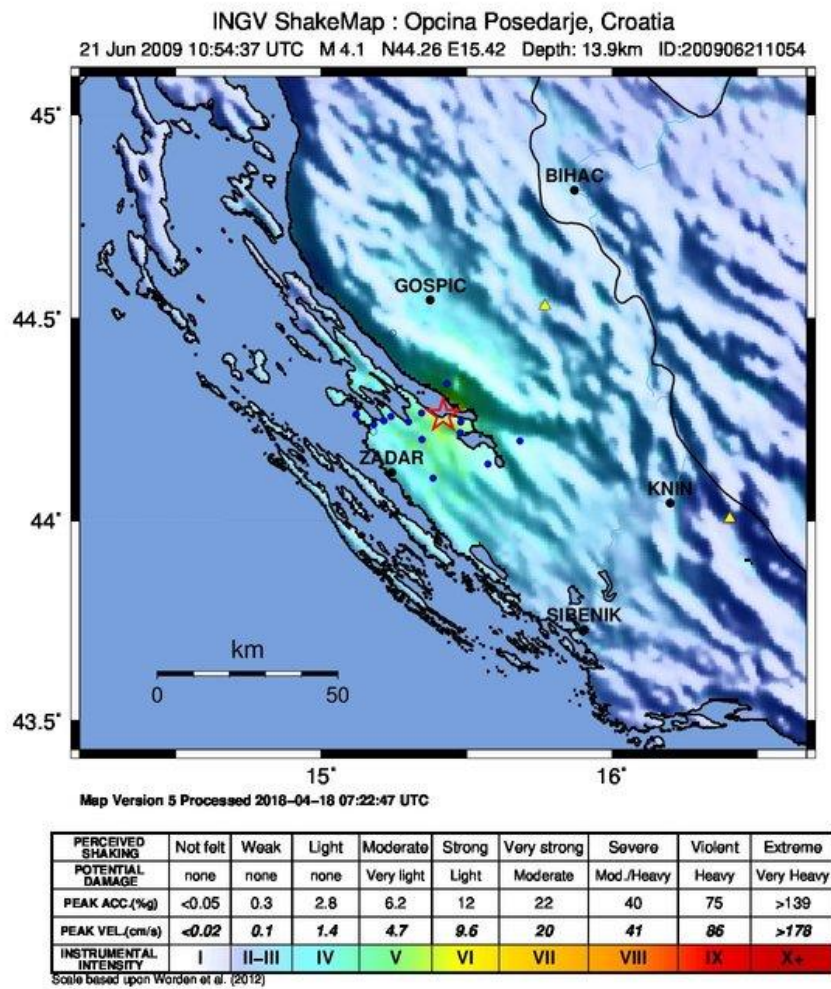
Slika 14. Karta izračunatog intenziteta potresa s epicentrom u blizini otoka Jabuke, iz 2003. godine.



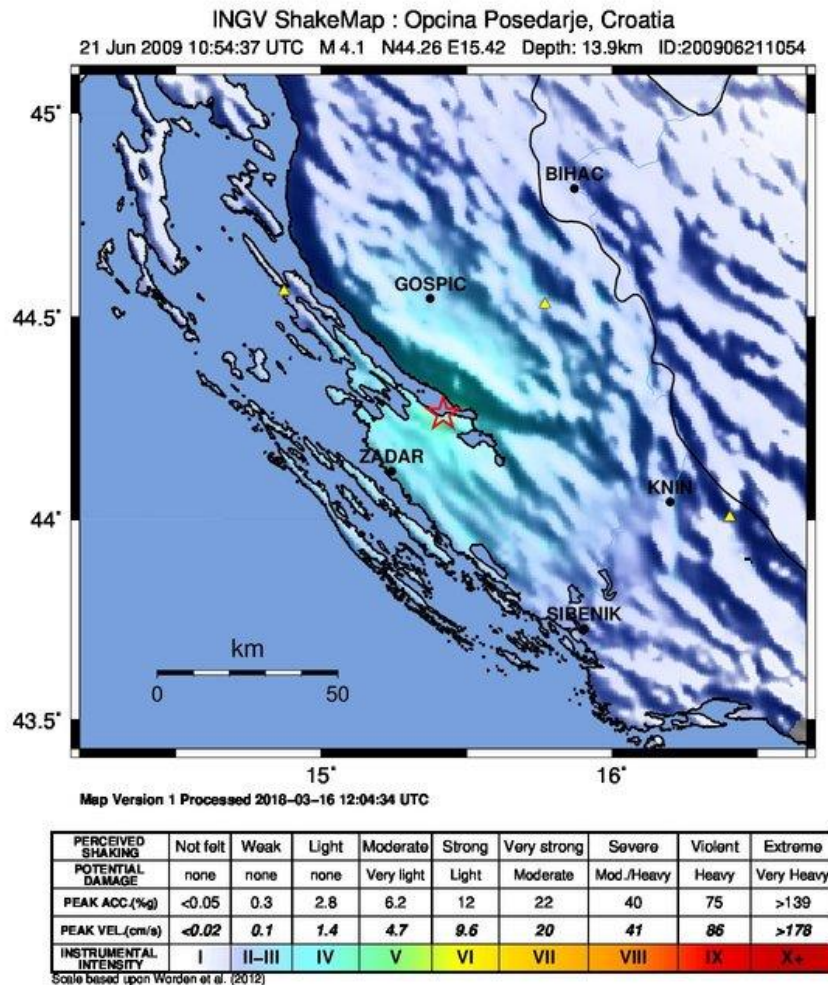
Slika 15. Lijevo: Karta vršnog ubrzanja. Desno: Karta vršne brzine, za potres s epicentrom u podmorju Jadrana, zapadno od otoka Jabuke.

Zadar (SZ7)

U ovom području analiziran je potres koji se dogodio 21. lipnja 2009. godine s epicentrom između Selina i Nina. Magnituda potresa iznosila je $M = 4.1$. Zabilježeno je da se potres osjetio na području Zadarske županije, što je dobro prikazano na karti potresne opasnosti, na kojoj se uočava da se na tom području osjetilo potresanje intenziteta IV °MMI ljestvice. Prikazane su dvije karte, prva s unesenim makroseizmičkim podacima (slika 16) prema kojoj je intenzitet u epicentru iznosio V - VI °MMI i druga bez (slika 17) opaženih vrijednosti intenziteta. Usporedimo li ih možemo uočiti da su vrijednosti intenziteta na slici 17 podcijenjene što se ne podudara s vrijednostima iz Arhiva Geofizičkog odsjeka PMF-a. To može biti rezultat više faktora, kao što su npr. odabir atenuacijskih relacija, relacija za prebacivanje podataka iz jednog oblika u drugi ili nedovoljno precizna geologija.



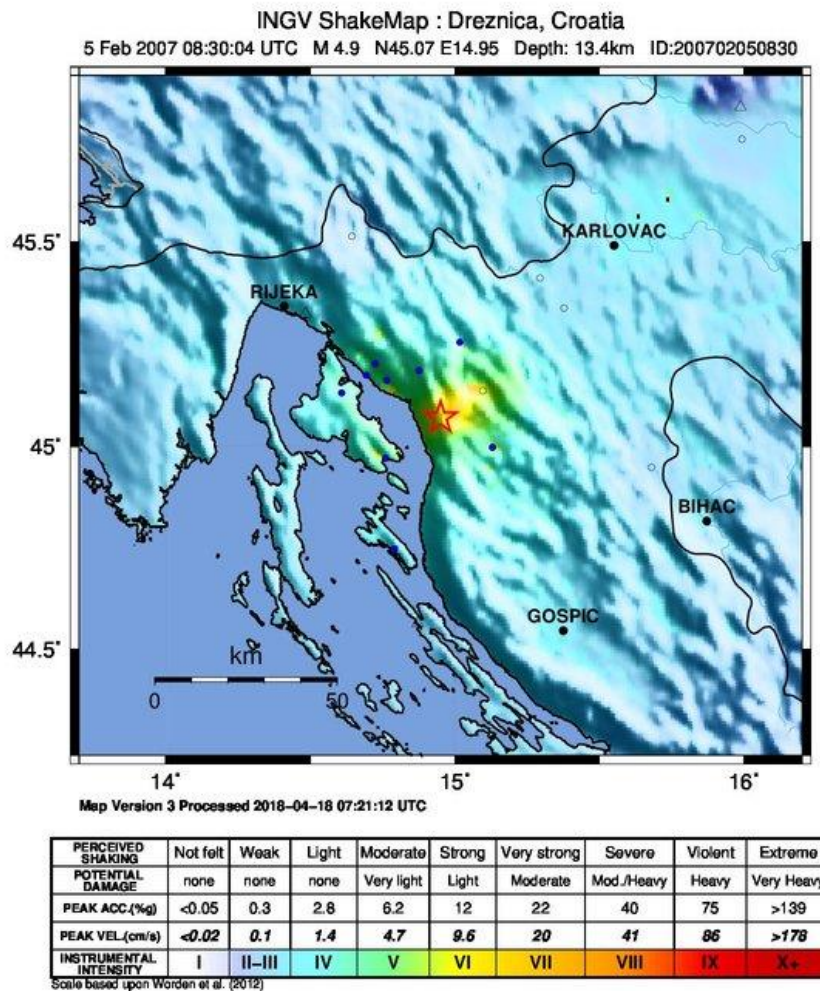
Slika 16. Karta potresne opasnosti s makroseizmičkim podacima za potres s epicentrom kod Zadra, iz 2009. godine.



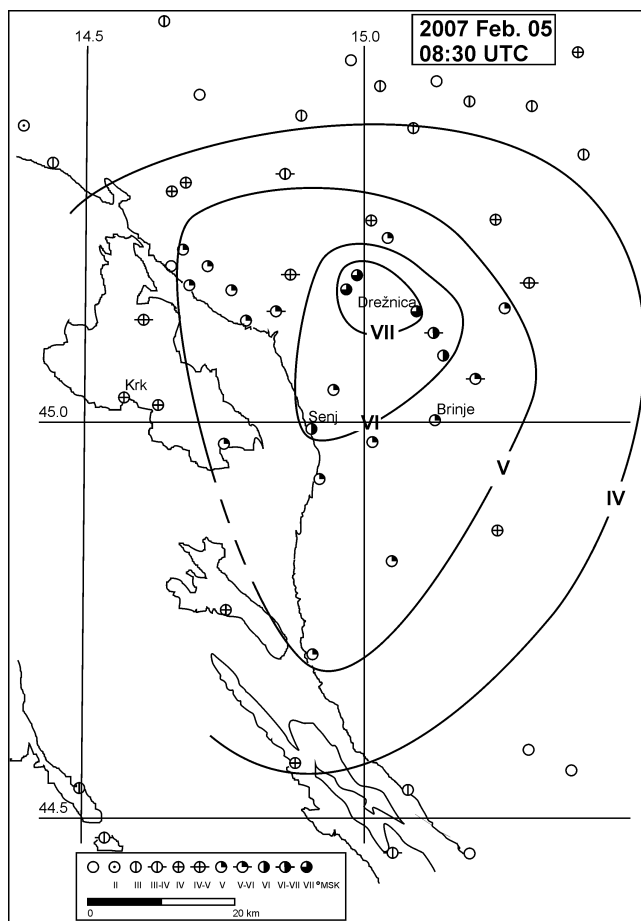
Slika 17. Karta potresne opasnosti bez makroseizmičkih podataka za potres s epicentrom kod Zadra, iz 2009. godine.

Vinodol (SZ8)

Dana 5. veljače 2007. godine zabilježen je potres koji je nanio veliku materijalnu štetu mjestu Drežnici, 20 km sjeveroistočno od Senja, gdje su od podrhtavanja popucali zidovi, srušeni dimnjaci i urušeni krovovi kuća. Potres je bio magnitude $M = 4.9$, osjetio se od Rijeke do Zadra, u Karlovcu i Zagrebu, kako stoji u izvješću Državne uprave za zaštitu i spašavanje. Na slici 18 prikazan je potres s izračunatim intenzitetom od VI - VII °MMI u epicentru. Za ovaj potres unesene su 63 vrijednosti opaženog makroseizmičkog intenziteta od kojih su samo neke prikazane plavim točkicama u mjestima oko epicentra gdje maksimalna vrijednost ne prelazi VII °MCS. Također, za usporedbu i procjenu točnosti izračunatih vrijednosti, prikazana je na slici 19 karta izoseista istog potresa (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a).



Slika 18. Karta potresne opasnosti za potres s epicentrom u blizini Novog Vinodolskog, iz 2007. godine.

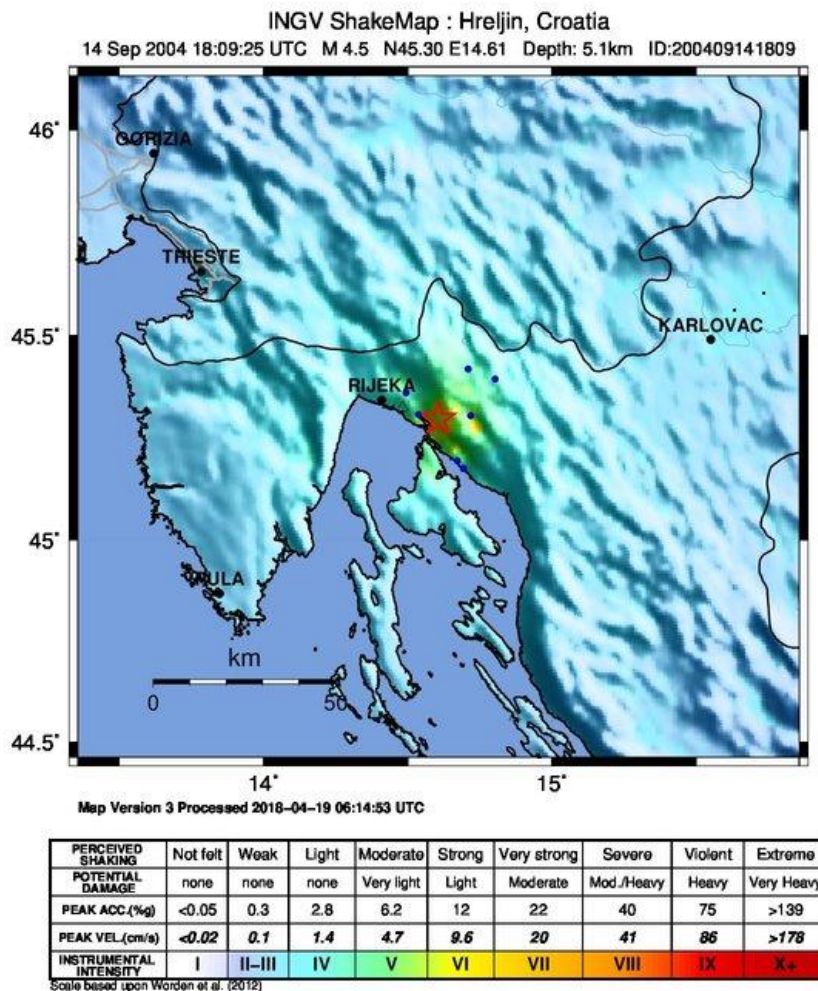


Slika 19. Karta izoseista potresa s epicentrom u blizini Novog Vinodolskog, iz 2007. godine (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a, Zagreb).

Usporedimo li kartu potresne opasnosti s kartom izoseista, vidljivo je da se karte na rubnom obalnom dijelu, jugozapadno od epicentra ne podudaraju u potpunosti. S druge strane, na jugoistočnom dijelu otoka Krka pokazuju iste vrijednosti intenziteta, kao i na ostalom, širem području.

Rijeka (SZ9)

Potres s epicentrom jugoistočno od Rijeke dogodio se 14. rujna 2004. godine. S magnitudom $M = 4.5$ i intenzitetom VI °MCS, ovaj događaj je najjači potres u posljednjih desetak godina na ovom području. S unesenih 47 opaženih makroseizmičkih intenziteta ShakeMap program daje izračun intenziteta u epicentru od V – VI °MMI što se slaže sa opaženim vrijednostima (slika 20). Na ovoj karti može se uočiti širok radijus ugroženog područja.



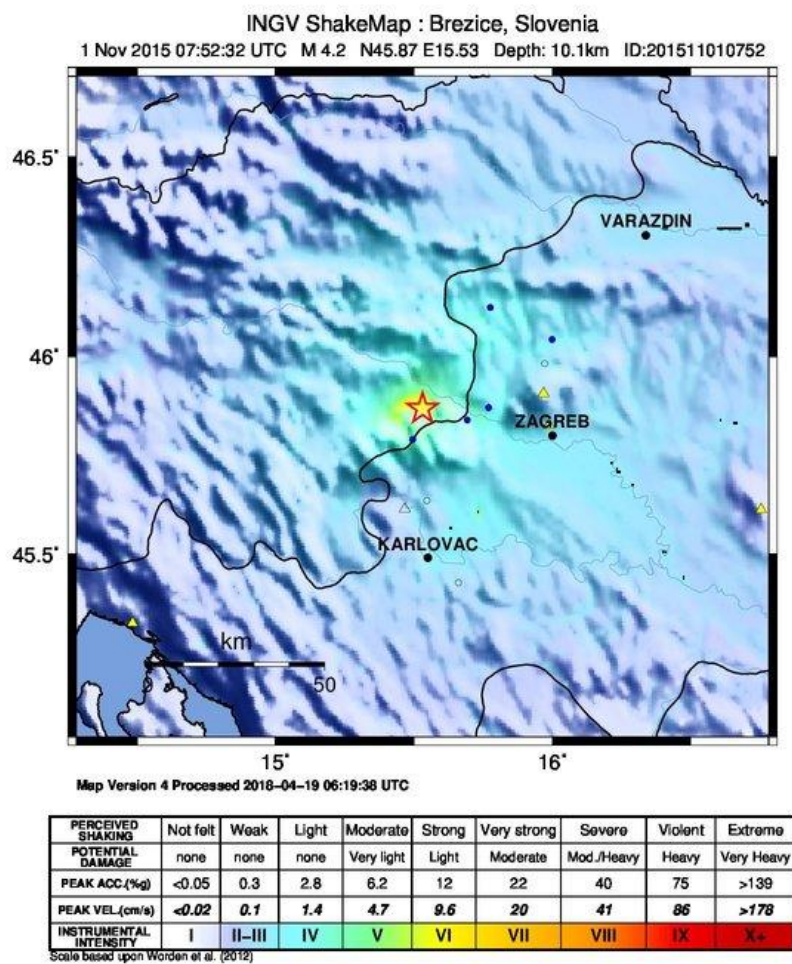
Slika 20. Karta potresne opasnosti potresa s epicentrom u blizini Rijeke, iz 2004. godine.

5.2. Seizmičke zone sjeverozapadne Hrvatske

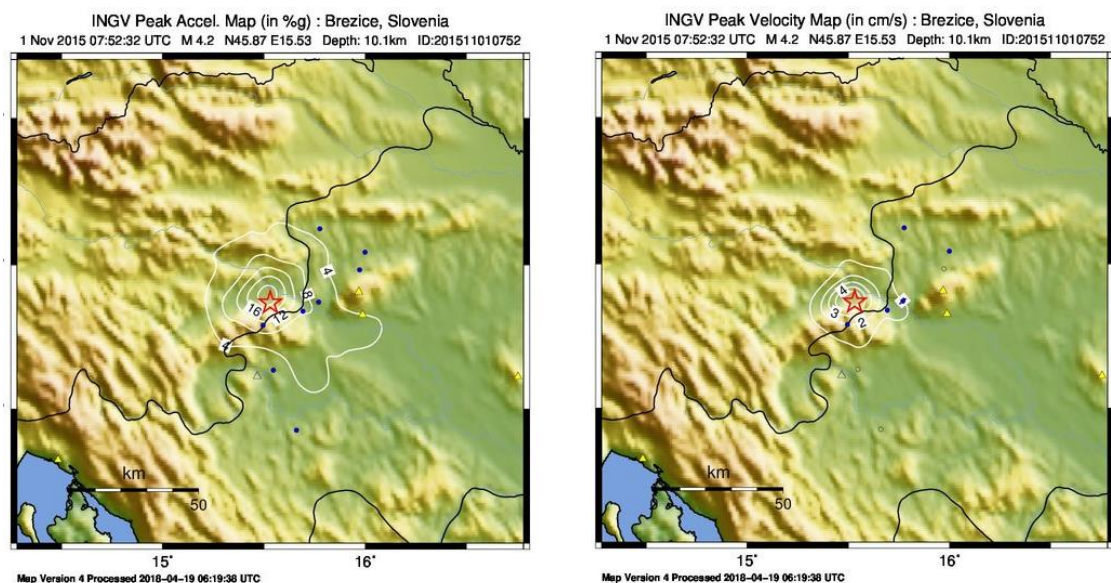
Bela Krajina (SZ10)

Ova seizmička zona uključuje i područje susjedne Slovenije, a karakterizirana je kao slabo seizmički aktivna [5]. Analiziran je potres čiji se epicentar nalazi na slovenskom teritoriju, kod Brežica. Dogodio se 1. studenog 2015. godine, magnituda mu je iznosila $M = 4.2$, a žarišna dubina 10.1 km. Prema makroseizmičkim zapisima ovaj potres se na Zagrebačkom području osjetio intenzitetom III °MCS, na nekim dijelovima i IV °MCS ljestvice. Na slici 21 prikazana je karta izračunatog intenziteta koji u epicentru iznosi VI °MMI, a u okolnom zagrebačkom području karta daje rezultate kakvi su i opaženi. Osim toga, na slici 22 prikazane su izolinije maksimalnog ubrzanja i brzine. Maksimalno

očekivano ubrzanje iznosi 16 cm/s^2 u području oko epicentra, a najveća brzina ne prelazi 4 cm/s .



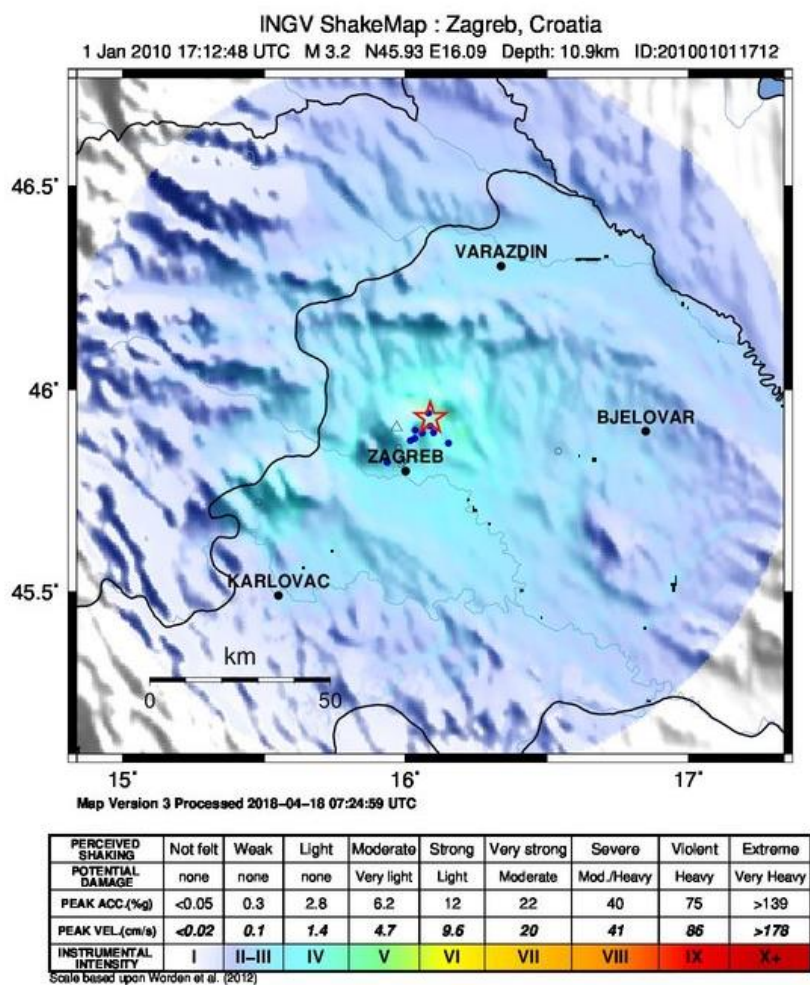
Slika 21. Gore: Karta potresne opasnosti potresa s epicentrom u Sloveniji, iz 2015. godine.



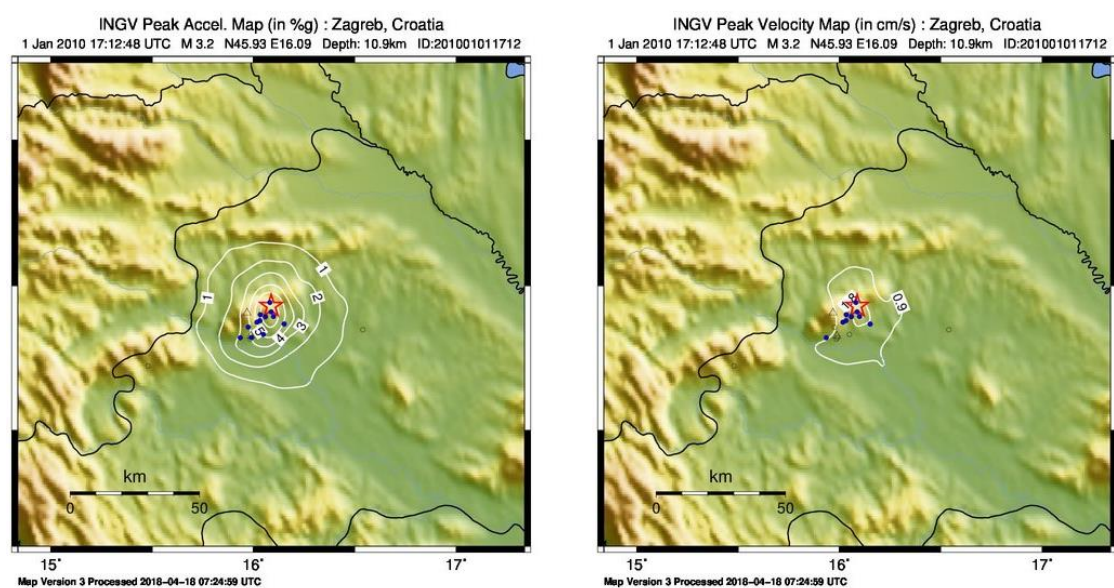
Slika 22. Lijevo: Karta vršne akceleracije. Desno: Karta vršnog ubrzanja potresa s epicentrom u Sloveniji.

Zagreb (SZ11)

Za ovu seizmičku zonu prikazana su dva potresa. Prvi potres, bez ikakve materijalne štete, dogodio se 1. siječnja 2010. godine s epicentrom sjever-sjeveroistok od Zagreba, magnitude 3.2, a intenziteta u epicentru III-IV °MCS ljestvice. Na slici 23 lijepo je prikazan opseg djelovanja potresa čiji se intenzitet podudara s onim zapisanim u Arhivu Geofizičkog odsjeka PMF-a. Karta izolinija vršnog ubrzanja i brzine ovog potresa prikazane su na slici 24, gdje je maksimalno ubrzanje nešto veće od 5 cm/s^2 , a brzina ne prelazi 1.8 cm/s .

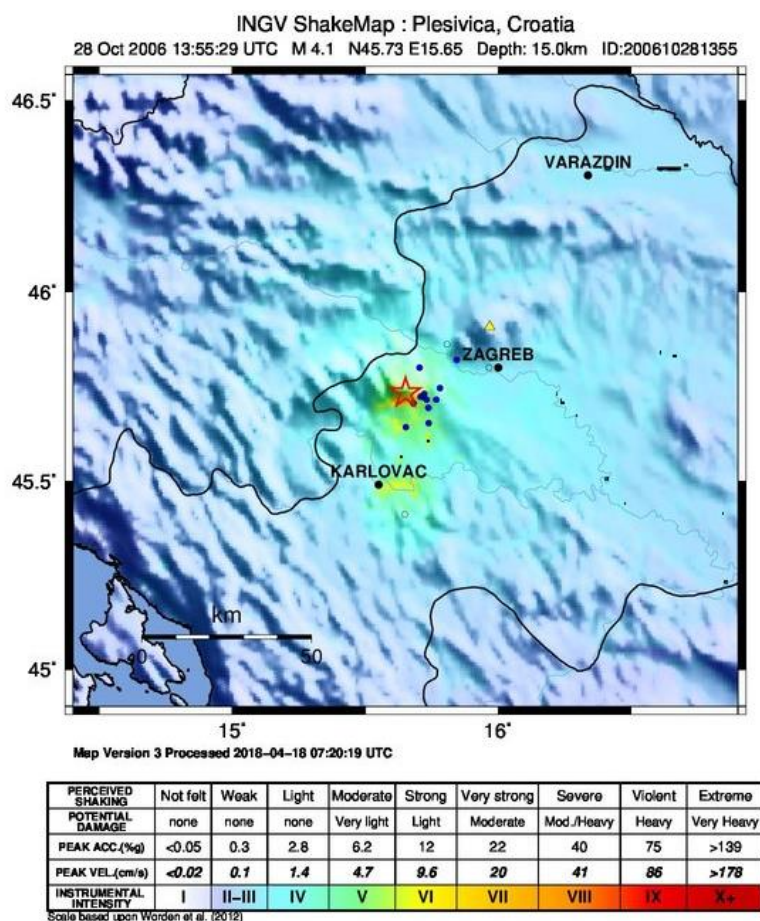


Slika 23. Karta izračunatog intenziteta potresa s epicentrom u Zagrebu, iz 2010. godine.

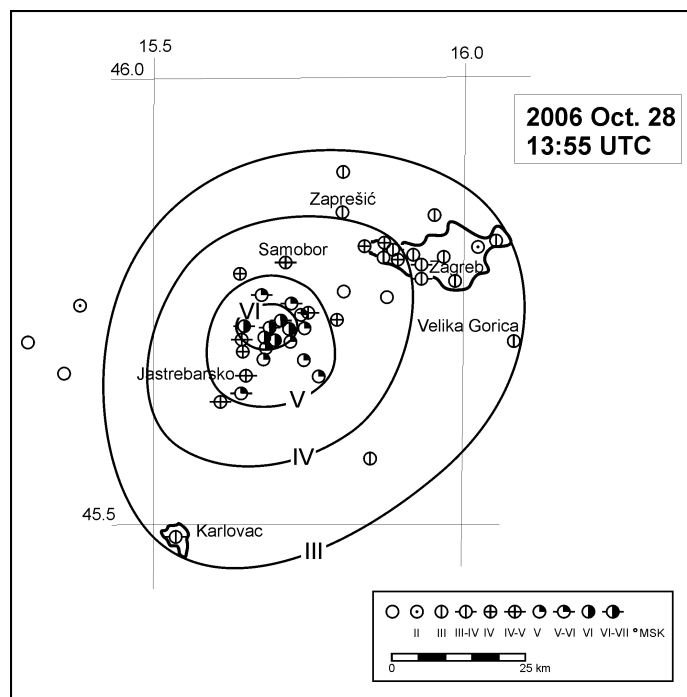


Slika 24. Lijevo: Karta izračunatog vršnog ubrzanja. Desno: Karta vršne brzine potresa s epicentrom u Zagrebu.

Drugi potres, nešto veće magnitude $M = 4.1$, s epicentrom na području između Zagreba i Karlovca, prema karti na slici 25 se više osjetio na Karlovačkom području, uz dolinu rijeke Kupe, s intenzitetom kao i u epicentru od VI °MMI ljestvice. Ovdje vidimo zanimljiv prikaz karte koja pokazuje rad i svrhu programskog paketa. Naime, sjeverno od epicentra nalazi se dolina rijeke Save, gdje je zabilježeni intenzitet manji, što je, vjerojatno, posljedica geologije i samog rasjednog segmenta kojeg ShakeMap program uzima u obzir. No ipak, usporedimo li kartu potresne opasnosti, koja pokazuje izračunati intenzitet s kartom izoseista (slika 26) dobivenih iz zapisa makroseizmičkih podataka, uočit ćemo da se intenziteti na području Karlovca ne podudaraju. Možda pri izradi karte izoseista nije bilo podataka o intenzitetu u dolini rijeke Kupe, što je moguće zbog izrazito rijetke naseljenosti ili je pak program precijenio vrijednosti za ovo područje.



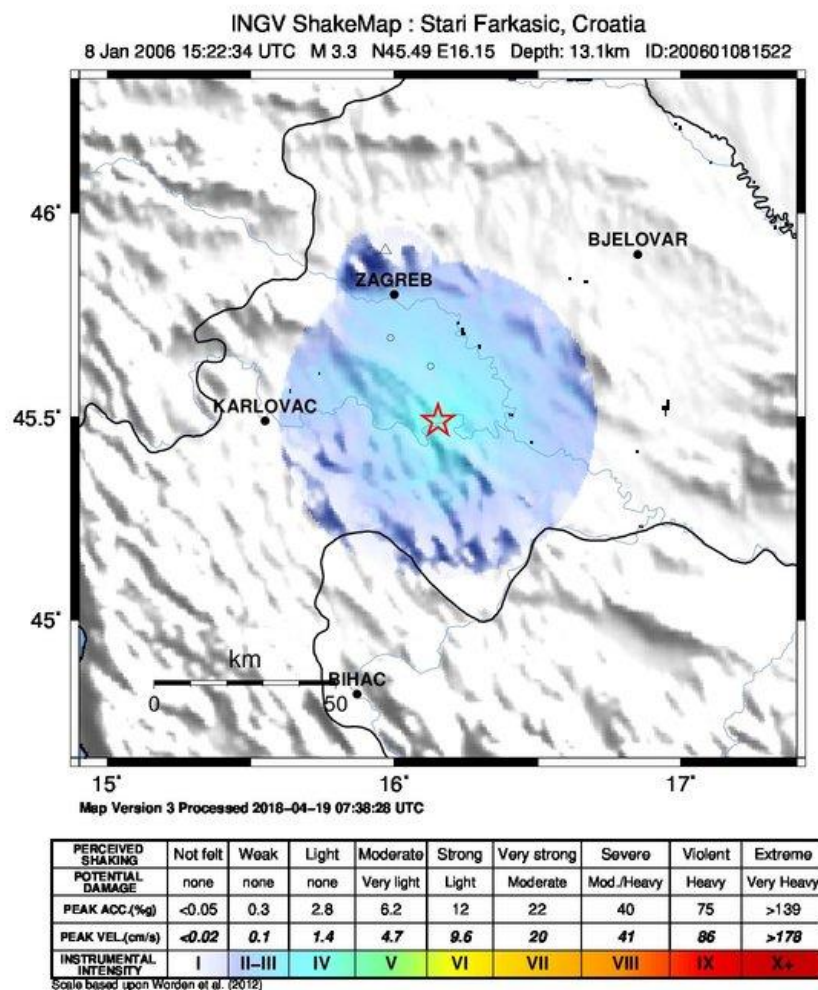
Slika 25. Karta izračunatog intenziteta potresa s epicentrom na području između Karlovca i Zagreba, iz 2006. godine.



Slika 26. Karta izoseista potresa s epicentrom na području između Karlovca i Zagreba, iz 2006. godine (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a, Zagreb).

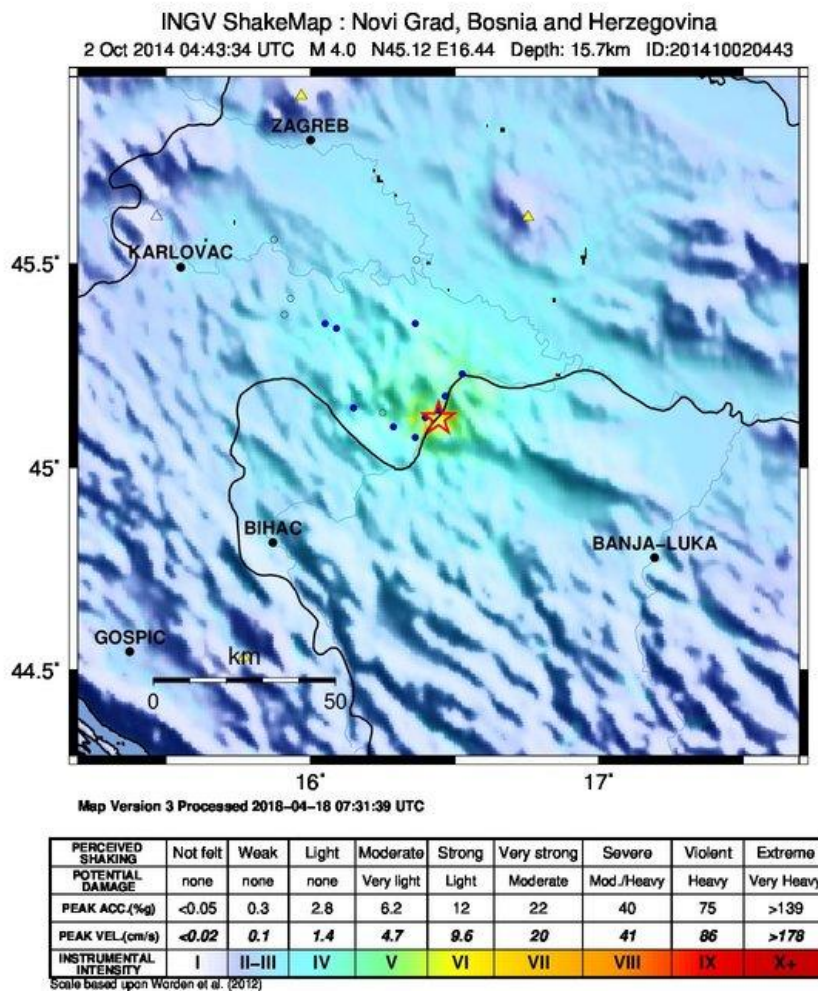
Dolina rijeke Kupe (SZ12)

Ovo područje je mjesto epicentra najpoznatijeg potresa u Hrvatskoj, onog iz 1909. godine, analiza kojeg je omogućila hrvatskom seizmologu Andriji Mohorovičiću otkriće plohe diskontinuiteta između kore i plašta. Prikazan je potres magnitude $M = 3.3$, žarišne dubine 13.1 km, koji se dogodio 2006. godine. Postojali su makroseizmički podaci s područja Ogulineca i Lukaveca, na slici 27 označeni malim kružićima, gdje je opaženi intenzitet iznosio III °MCS. Karta daje dobar uvid u ugroženo područje, gdje se intenziteti slažu s onima iz Arhiva Geofizičkog odsjeka PMF-a. Vidi se da je na području Zagreba, koji je udaljen oko 20-ak km od epicentra, intenzitet iznosio II °MMI.



Slika 27. Karta izračunatog intenziteta potresa s epicentrom u dolini rijeke Kupe, iz 2006. godine.

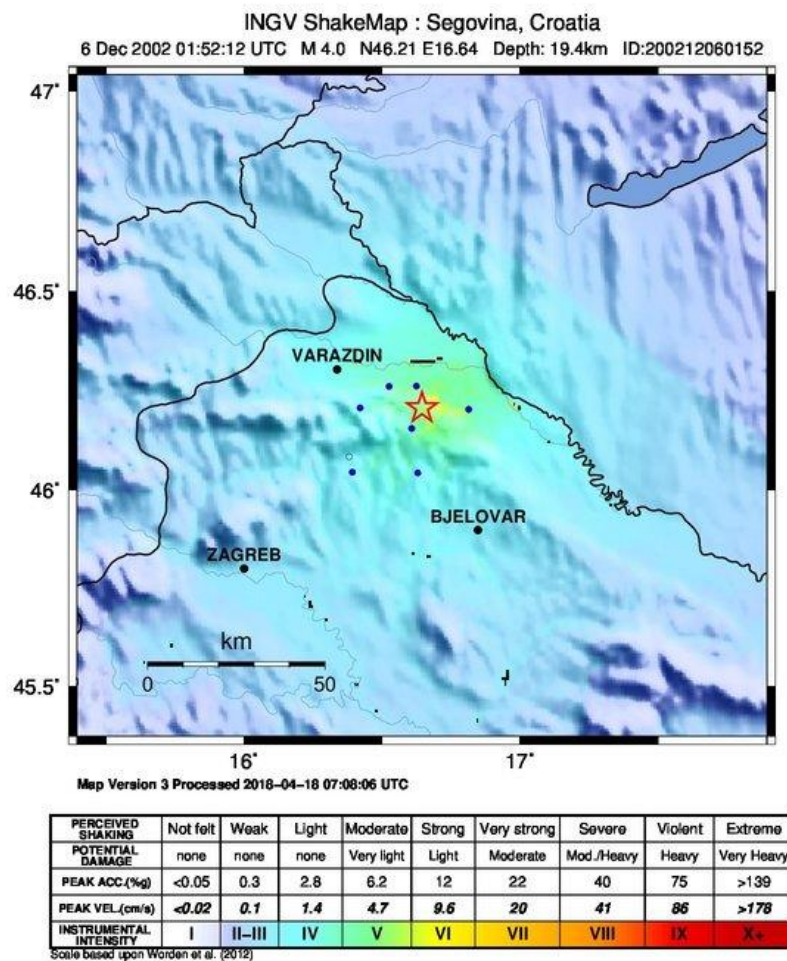
Također, prikazan je i potres s epicentrom neposredno ispod ove zone, uz samu granicu Hrvatske i Bosne i Hercegovine. Potres je bio magnitude $M = 4.0$, a dogodio se 10-ak km od Siska podno Zrinske gore u Novom Gradu u Bosni i Hercegovini, žarišta na dubini od 15.7 km. Prema izvještajima potres se osjetio u Zagrebu i Karlovcu, što se može uočiti i na karti prikazanoj na slici 28 koja pokazuje nešto veći intenzitet na Karlovačkom području. Intenzitet u epicentru iznosi V – VI °MMI, što čini ovu kartu dosta dobrim uvidom u ugroženo područje. Sjeverno od epicentra radijus rasprostiranja intenziteta je mnogo veći nego južno, što je posljedica protezanja Dinarida južnije od Bihaća i Banja Luke u području Bosne i Hercegovine.



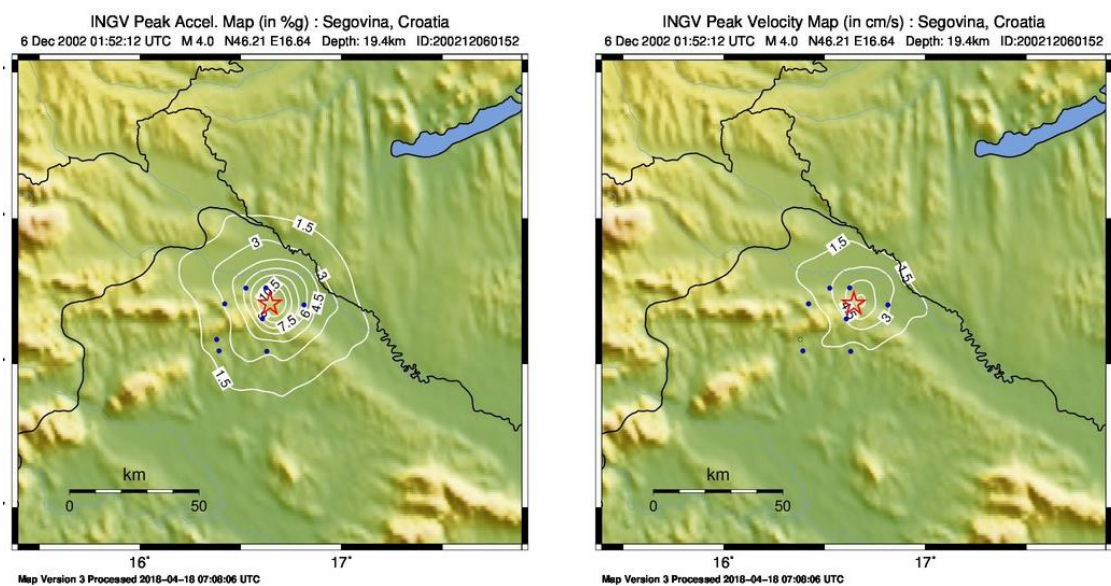
Slika 28. Karta potresne opasnosti za potres s epicentrom u Novom Gradu, BiH, iz 2014. godine.

Varaždin (SZ13)

U području jugoistočno od grada Varaždina zabilježen je 6. prosinca 2002. godine, potres magnitude $M = 4.0$ i žarišne dubine 19.4 km. Poznavanje makroseizmičkih vrijednosti pridonijelo je poboljšanju izrade karte koja prikazuje područja u kojima se osjetio potres. Intenzitet u epicentru je iznosio V °MCS ljestvice.



Slika 29. Karta izračunatog intenziteta potresa s epicentrom kod Varaždina, iz 2002. godine.

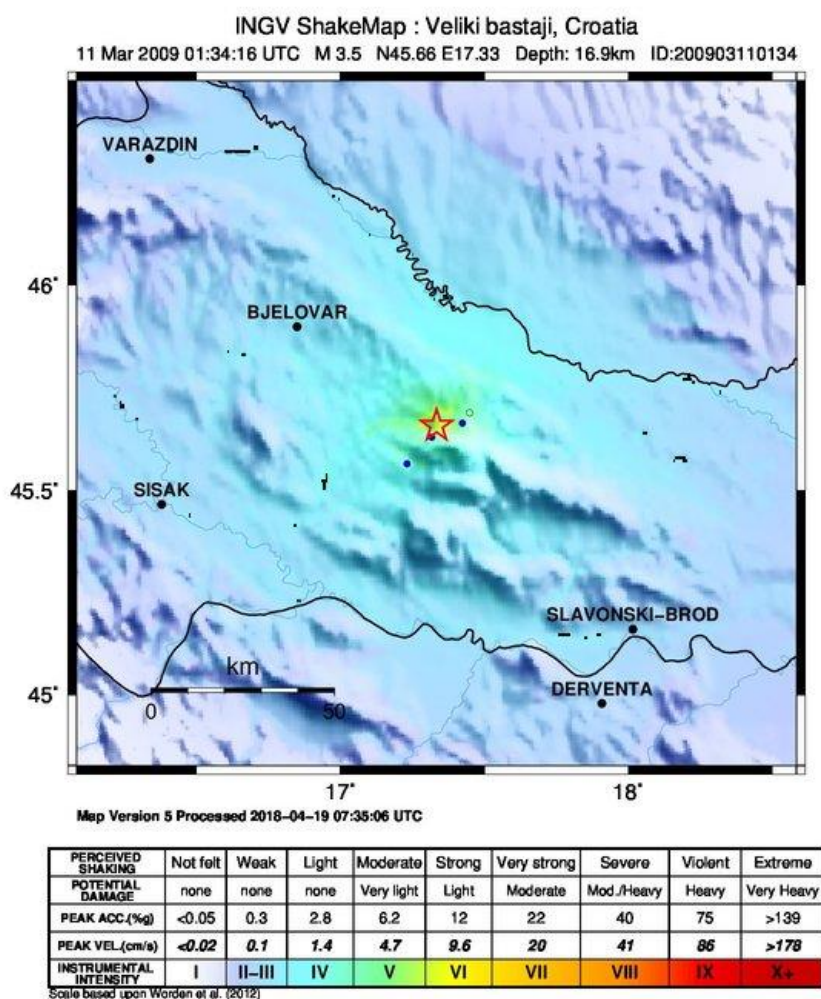


Slika 30. Lijevo: Karta vršnog ubrzanja. Desno: Karta vršne brzine potresa s epicentrom kod Varaždina.

Pogledamo li pažljivo sliku 29 može se primijetiti kako intenzitet potresa ne opada s udaljenošću, odnosno zbog amplifikacije intenzitet je veći na nekim udaljenijim mjestima što čini ovu kartu reprezentativnim prikazom ugroženosti ovog područja, a što potvrđuje i preklapanje izračunatih intenziteta s onima iz Arhiva Geofizičkog odsjeka PMF-a . Na slici 30 vidi se da je maksimalno očekivano ubrzanje 10.5 cm/s^2 , a brzina 4.5 cm/s .

Dolina rijeke Drave (SZ14)

Zadnja zona za koju je napravljena karta potresne opasnosti je zona koja obuhvaća područje Koprivnice te planina Kalnik i Bilogora. Tu se južno od Virovitice dogodio potres magnitude $M = 3.5$, 11. ožujka 2009. godine. U svrhe izrade karte potresne opasnosti korišteni su makroseizmički podaci sa 4 lokacije. Slika 31 pokazuje da intenzitet u epicentru iznosi V °MMI što je u skladu s opaženim intenzitetom.



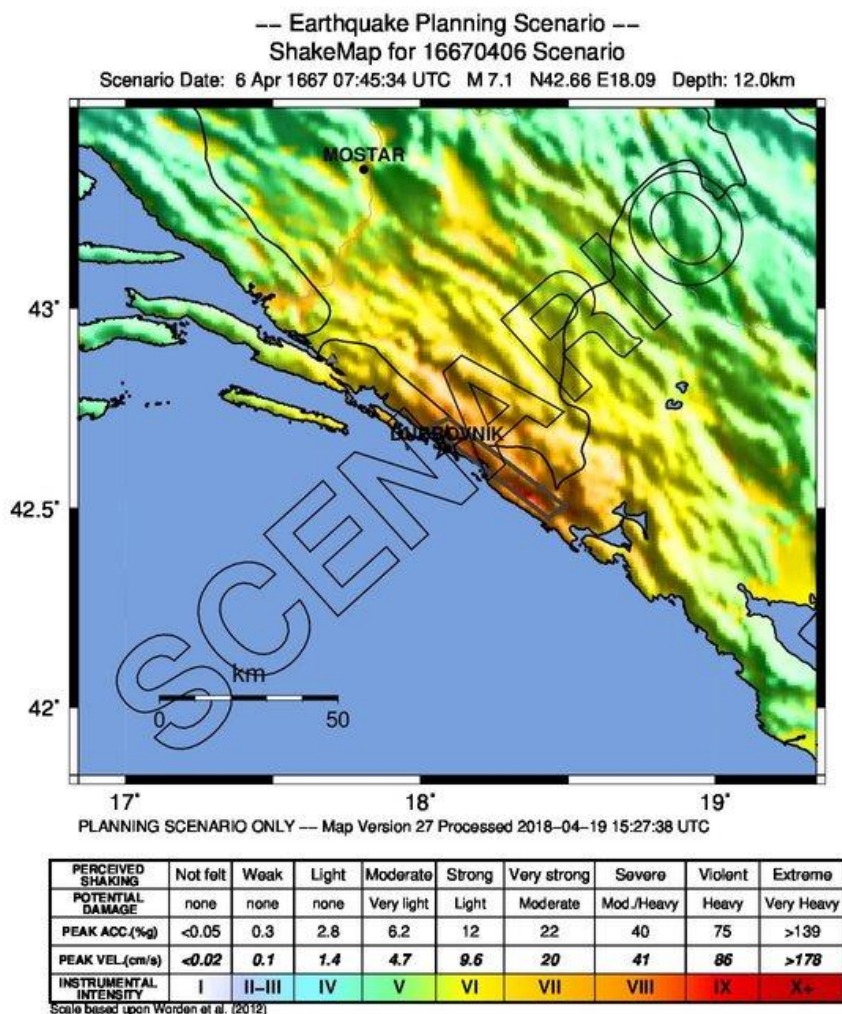
Slika 31. Karta potresne opasnosti potresa s epicentrom u dolini rijeke Drave, iz 2009. godine.

5.3. Karte scenarija potresne opasnosti

Osim za potrese s digitalnim zapisima kreirane su i karte scenarija nekih od seizmički važnijih povijesnih potresa u Hrvatskoj.

6. travanj 1667.

Najstariji i najsnažniji, veliki dubrovački potres koji se dogodio 6. travnja 1667. godine zasigurno zaslužuje veliku pozornost jer je svojim utjecajem opustošio Dubrovnik i okolicu te ima značajan utjecaj na seizmičnost i procjenu hazarda. Potres se osjetio intenzitetom od VIII °EMS (Europske Makroseizmičke skale) ljestvice južno od Dubrovnika, sve do Budve koja je 70 km udaljena od epicentra, a sjeverno do četrdesetak km udaljenog Stona [19]. Dodatna saznanja govore da je maksimalni intenzitet iznosio čak IX-X °EMS što ovaj potres čini najsnažnijim zapisanim događajem na obalnom dijelu Hrvatske [20].

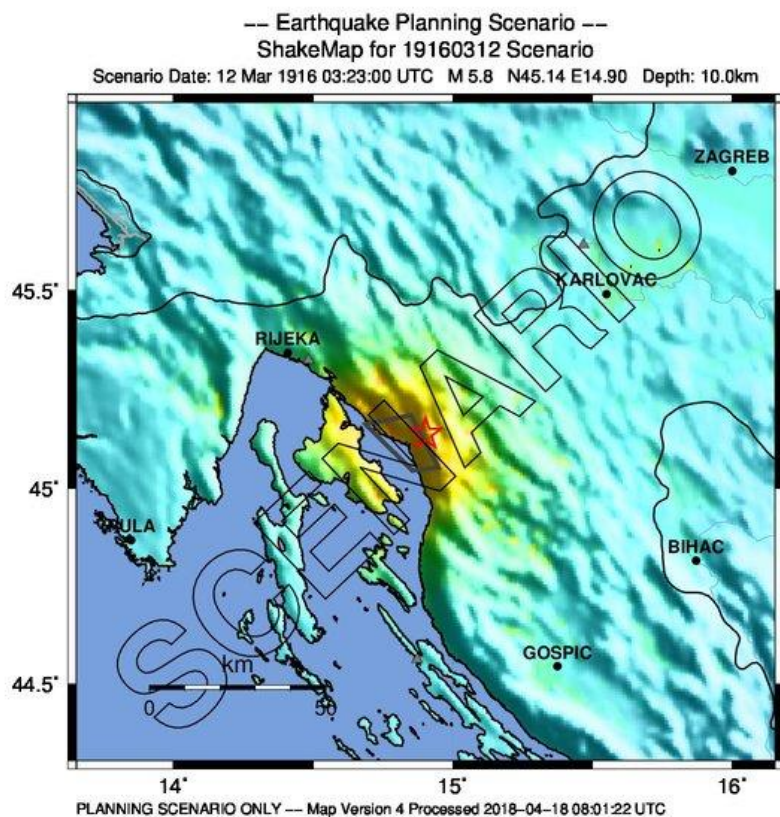


Slika 32. Karta scenarija Velikog Dubrovačkog potresa iz 1667. godine.

Ulazni podatci za izradu karte uzeti su iz rada Markušić i sur. [20] gdje je epicentar potresa smješten desetak kilometara sjevernije od lokacije koja se nalazi u Hrvatskom katalogu potresa. Osim toga napravljena je datoteka koja sadrži informacije o rasjednoj zoni čiji podaci pridonose prikazu raspodjele intenziteta. Duljina rasjedanja uzeta je približno 30 km, kako stoji u gore navedenom radu, kao i pružanje rasjeda u smjeru sjeverozapad-jugoistok. Usporede li se ovdje izračunati intenziteti sa onim dobivenim u radu Markušić i sur. vidi se da su izračunate vrijednosti podcijenjene. U samoj rasjednoj zoni prikaz vrijednosti intenziteta je dosta dobar, no izvan označenog područja, idući jugoistočno od Dubrovnika prema Crnoj Gori, vrijednosti intenziteta padaju za što znamo da nije točno jer je intenzitet npr. u Kotoru iznosio IX °MCS. Razlog ovim podcijenjenim vrijednostima zasigurno leži u tome što geološka karta Crne Gore uopće nije uzeta u obzir.

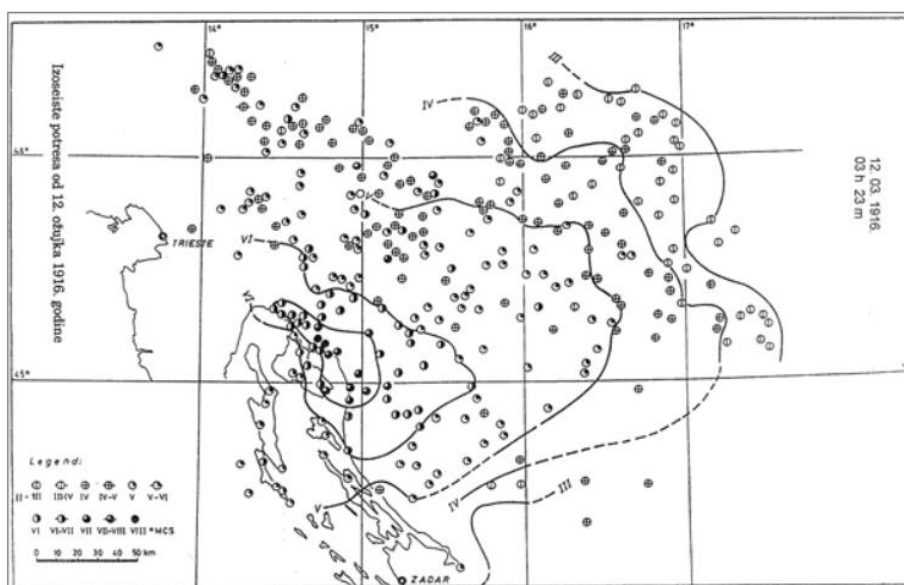
12. ožujak 1916.

Drugi važan događaj za Hrvatsku je svakako Vinodolski potres iz 1916. godine kada se, desetak kilometara istočno od Novog Vinodolskog, intenzitetom u epicentru VIII °MCS ljestvice zatreslo tlo. Izračunata je magnituda iznosila $M = 5.8$. Prema Herak i sur. [21] potres je najveću štetu prouzročio u Grižanima, a osjetio se i u Istri, Primorju, Karlovcu, Zagrebu i Sloveniji [21].



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%g)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based upon Worden et al. (2012)

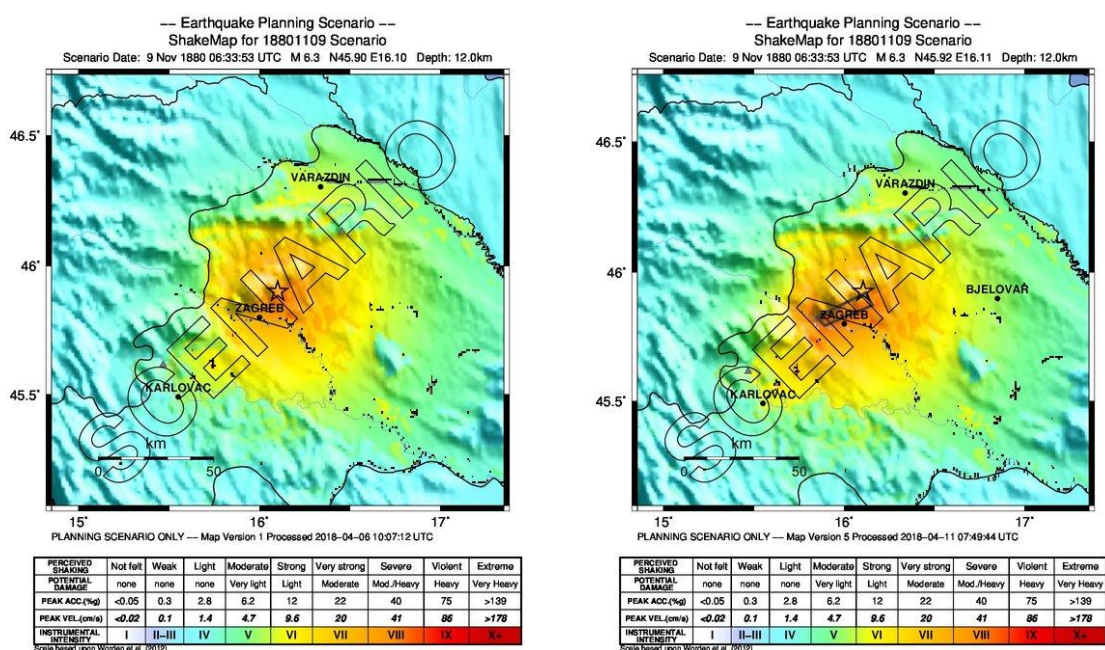


Slika 33. Gore: Karta scenarija Vinodolskog potresa iz 1916. godine. Dolje: Karta izoseista (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a, Zagreb).

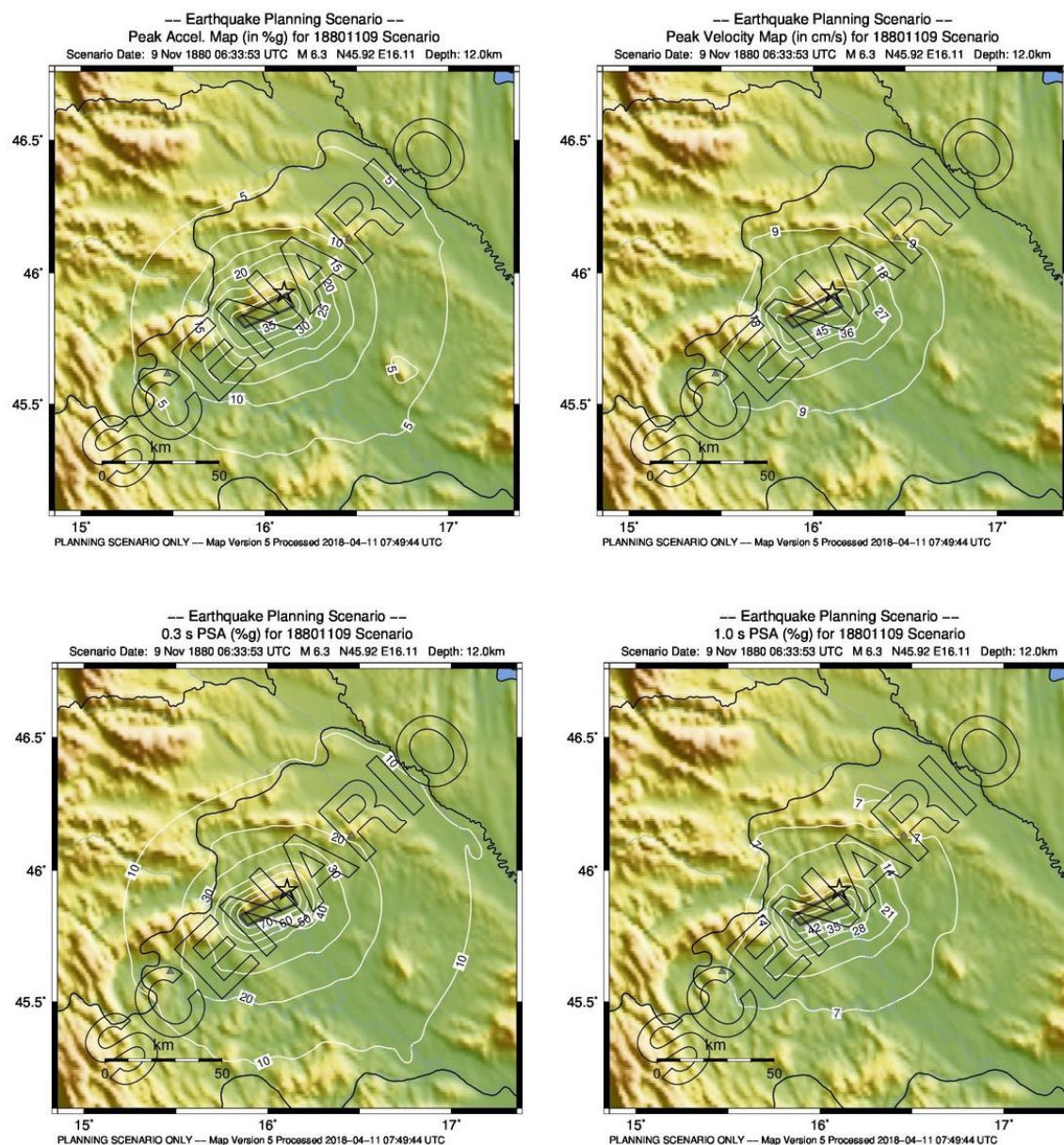
Ovdje se može vidjeti zanimljiva raspodjela intenziteta. Oko Rijeke i Karlovca primjećuju se žuto osjenčani kružići (intenziteta V °MMI), baš kako navode i zapisi. Nešto manji intenzitet (IV °MMI) prikazan je na području Zagreba, Slovenije i Istre. Kada pri generiranju karte potresne opasnosti ne bi uključili rasjedno područje, prikazani intenziteti bili bi manji. Usporedbom s kartom izoseista, koja je prikazana u manjem mjerilu, može se doći do zaključka da karte potresne opasnosti daju jako dobre rezultate.

9. studeni 1880.

Izrazitu važnost za Zagreb ima potres koji se dogodio 9. studenog 1880. godine. Epicentri najsnažnijih potresa na ovom području zasigurno se nalaze na Medvedničkom području, gdje se smješta epicentar i ovog potresa, oko mjesta Kašina i Planina [22]. Poznato je da je maksimalni intenzitet u epicentru i najbližoj okolini procijenjen na IX °MCS ljestvice, a u ostalom dijelu grada Zagreba na VIII °MCS. Točnu magnitudu možemo samo pretpostaviti jer u to vrijeme nije bilo digitalnih zapisa, a ona bi mogla biti oko $M = 6.0 - 6.5$ [22]. Za izradu karte scenarija u ovom radu uzeta je magnituda iznosa $M = 6.3$.



Slika 34. Lijevo: Karta scenarija Zagrebačkog potresa iz 1880. godine bez označene rasjedne zone. Desno: Karta scenarija s označenom rasjednom zonom.



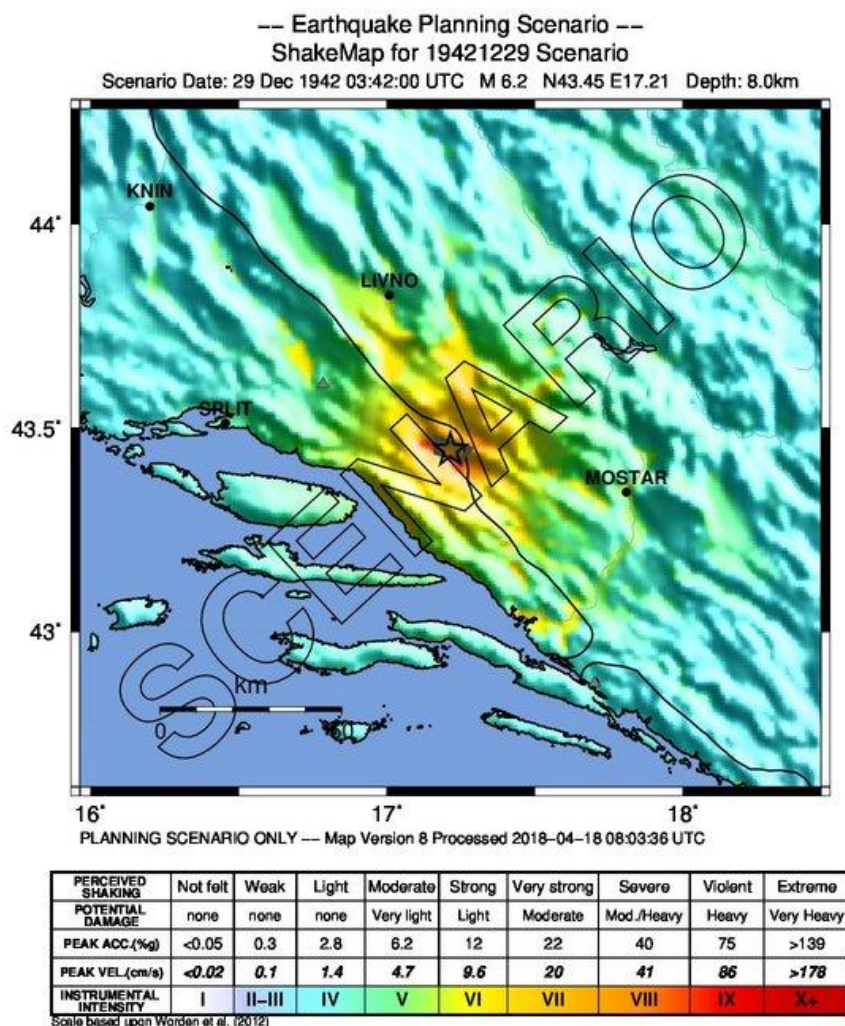
Slika 35. Gore lijevo: Karta vršnog ubrzanja. Gore desno: Karta vršne brzine. Dolje lijevo: Karta spektra odziva za period od 0.3 s. Dolje desno: Karta spektra odziva za period 1 s Zagrebačkog potresa iz 1880. godine.

Na slici 34 lijevo je prikazan scenarij zagrebačkog potresa bez rasjedne zone, a s desne strane, kako bi uočili razlike, nalazi se scenarij s rasjednom zonom. Kako nisu poznate točne koordinate rasjeda, pojedina rasjedna zona tražena je na osnovu karte najvažnijih rasjednih seizmičkih zona za područje Hrvatske [23]. Na lijevoj slici se može uočiti manje područje zahvaćeno intenzitetom VIII °MMI nego na desnoj s rasjednom zonom, ali se sa sigurnošću ne može potvrditi koja je karta reprezentativniji prikaz zbog nedostatka podataka o ovom potresu. Na slici 35 prikazano je vršno ubrzanje (lijevo) čija je maksimalna

vrijednost 35 cm/s^2 te vršna brzina gibanja (desno) čija je najveća vrijednost 45 cm/s . Izolinije zahvaćaju velik opseg područja i mogu poslužiti kao dobar odgovor na pitanje je li ovaj potres uzrokovao likvefakciju u riječnim predjelima. Prednost potresnog scenarija je svakako to, što programski paket automatski izbacuje i ove karte, tako da je dat uvid utjecaja potresa za svaki parametar. Na slici 35 prikazane su izolinije spektra ubrzanja za period 0.3 s (lijevo) i 1 s (desno) koje predstavljaju ubrzanje tla od 70 cm/s^2 odnosno 42 cm/s^2 na zahvaćenom području te daju moguće informacije o odgovoru konstrukcije na potresno djelovanje.

29. prosinac 1942.

Budući da broj potresa i njihova jakost raste idući od sjeverozapada prema jugoistoku Hrvatske te da se najveći broj potresa, kao i najjači potresi događaju na prostoru Stona i Dubrovnika, prikazana su za ovo područje još tri potresa od kojih je najrecentniji onaj iz 1996. godine u Stonu. Prva prikazana karta scenarija je za potres koji se dogodio prije 76 godina na području Imotske krajine [24]. Zabilježeno je da je velik broj ljudi poginuo pod ruševinama kuća i lavinama kamenja. Epicentar potresa je bio u primorskim predjelima oko planine Biokovo na granici između Hrvatske i Bosne i Hercegovine na dubini od 8 km , dok su se blaga podrhtavanja mogla osjetiti i u Zagrebu. Magnituda potresa bila je 6.2 . Na slici 36 uočavamo da je izračunati intenzitet u području rasjedne zone iznosio i do $\text{IX}^\circ \text{MMI}$ ljestvice što se slaže sa zapisima u Arhivu Geofizičkog odsjeka PMF-a. Kako to često biva na ovom području, može se uočiti utjecaj potresanja na Neretvansku dolinu, gdje se prema karti scenarija potres mogao osjetiti intenzitetom $\text{V-VI}^\circ \text{MCS}$. Uočava se nejednolika raspodjela intenziteta potresa koja se proteže do Livna udaljenog nešto više od 40 km , što intuitivno možemo objasniti time da je ovo ravničarsko područje s nekoliko jezera. Kako god, karta daje dobre prve informacije o događaju i ugroženim mjestima te služi kao sjajan alat prilikom planiranja / organiziranja hitnih intervencija.

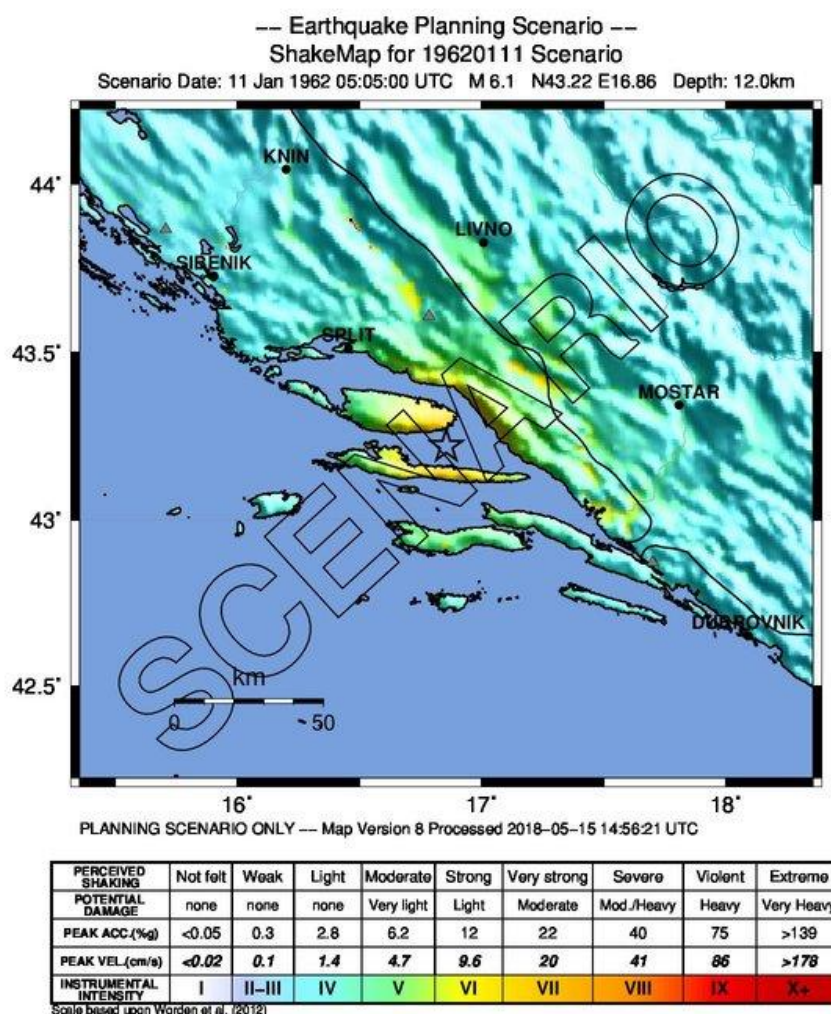


Slika 36. Karta scenarija izračunatog intenziteta potresa iz 1942. godine s epicentrom na području Imotskog.

7. siječanj 1962.

Godine 1962. na području Makarske, koja tada nije bila naseljena i turistički razvijena kao danas, cjelokupno je stanovništvo bilo evakuirano nakon velikih potresanja. Naime, četiri dana prije glavnog potresa dogodio se prethodni potres magnitude $M = 5.9$ koji je uzrokovao puknuće makarske obale (rive) u dužini od približno sedamsto metara. Dana 11. siječnja dogodio se glavni, katastrofalni potres magnitude $M = 6.2$ s intenzitetom u epicentru VIII-IX °MCS ljestvice, koji je bez krova nad glavom ostavio oko 13 200 stanovnika. Nakon njega uslijedili su brojni manji potresi. Zbog straha od novih potresa, koji su najviše pogodili stanovništvo, građani su se masovno preselili u mjesta uz obalu [25]. Na slici 37 prikazana je karta scenarija gdje se epicentar nalazi zapadno od označene rasjedne zone, no moguće da ju je aktivirao. Uočava se najveći intenzitet od VII – VIII °MMI na

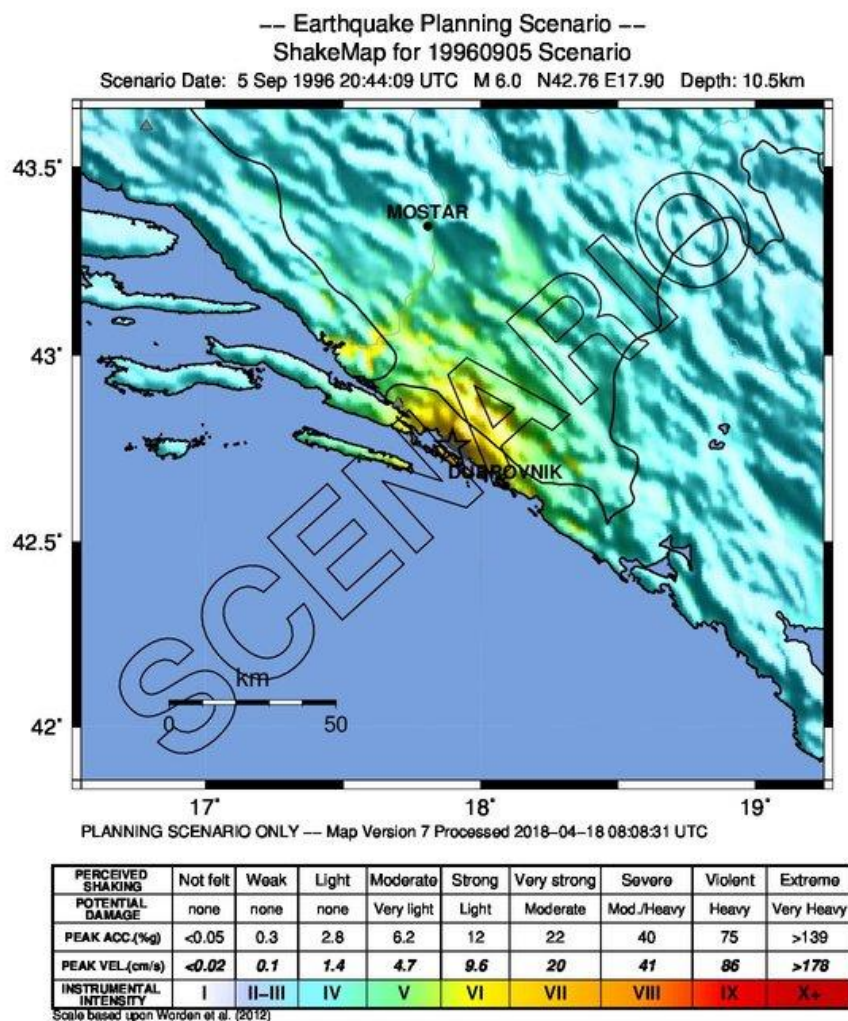
području Makarske. Prikazana je nejednolika raspodjela intenziteta potresa čije su se posljedice osjećale širom obalne. Zapravo je upitno koliko je ova karta reprezentativna jer je vrlo moguće da podcjenjuje vrijednosti intenziteta prikazane na okolnim otocima Hvaru i Braču.



Slika 37. Karta scenarija potresa iz 1962. godine s epicentrom blizu Makarske.

5. rujna 1996.

Treći najsnažniji potres bio je 5. rujna 1996. godine, s epicentrom u blizini mjesta Slano gdje su se dogodile najveće štete ($M_L = 6.0$, $I_{max} = VIII$ °MSK). Glavni potres bio je popraćen tisućama naknadnih, koji su se pojavljivali sve do kraja godine. Ovo je najduži seizmički niz na Dubrovačkom području od katastrofalnog potresa iz 1667. godine [26].



Slika 38. Karta scenarija izračunatog intenziteta potresa iz 1996. godine s epicentrom kod Slanog.

Karta potresne opasnosti prikazana na slici 38 pokazuje usko područje intenziteta VII °MMI ljestvice te ako je usporedimo s kartom izoseista iz Markušić i sur. [26], vidi se da su svi izračunati intenziteti nešto niži osim onih na Neretvanskom području udaljenom oko 45 km od epicentra na kojem je prikazani intenzitet od VI °MMI malo precijenjen. Također sjeverozapadno od epicentra, do Orebića, rasprostirao se intenzitet od VI °MCS prema karti izoseista što je na ovoj karti podcijenjeno. Za područje jugoistočno od epicentra, ispod Dubrovnika, karte scenarija daju reprezentativnu distribuciju intenziteta.

6. Zaključak

U ovom je radu prikazana primjena 3.1 ShakeMap programskog paketa, instaliranog u Nacionalnom institutu za geofiziku i vulkanologiju u Rimu, na potrese s epicentrima na području Hrvatske. Kreirano je ukupno 17 karata seizmičke opasnosti za 12 prije podijeljenih seizmičkih zona, gdje su za neke potrese prikazane i odgovarajuće karte vršnog ubrzanja, vršne brzine te karte spektra odziva za 0.3, 1, 3 s. Osim toga, radi usporedbe prikazane su i karte izoseista za određene potrese. Kako su za izradu karata potrebni zapisi širokopojasnih seizmografa i akceleroografa, raspolagano je potresima poslije 2002. godine tj. od kada u Hrvatskoj postoje digitalni zapisi. Područje Hrvatske je u razmatranom razdoblju (2002. – 2015.) slabo do srednje seizmički aktivno, što rezultira da najviša magnituda obrađenih potresa iznosi $M = 5.9$ i to za potres čiji je epicentar u podmorju Jadrana, dok su ostali potresi magnitude manje od $M = 5.3$.

Za izradu karata korišten je prilagođeni model atenuacijskih relacija za područje Europe te model relacija za pretvaranje vršnih gibanja u intenzitet za područje Kalifornije [11]. Za prostornu korekciju korištena je geološka karta Hrvatske s mjerilom 1:300 000 gdje su svakoj litološkoj jedinici u geološkoj kategorizaciji prema Eurokodu 8 dodijeljene određene brzine V_{s30} . Osim za područje Hrvatske, geološka klasifikacija litologije napravljena je i za područje Bosne i Hercegovine. Može se primijetiti da izrađene karte čiji ulazni podaci sadržavaju makroseizmičke podatke dosta dobro pokazuju prostornu raspodjelu intenziteta dok one izrađene bez makroseizmičkih podataka podcjenjuju intenzitet. To može biti rezultat nedovoljno precizno definirane geologije, odabira atenuacijskih relacija i relacija za pretvaranje gibanja u intenzitet ili malog broja seizmoloških stanica.

Osim toga, napravljeno je i 6 karata scenarija povijesnih potresa za koje su trebali minimalni ulazni podaci: magnituda i koordinate lokacije potresa. Osim toga, unošeni su i drugi, opcijski podaci ukoliko su bili poznati, od kojih je najznačajniji onaj o geometriji rasjedanja, a koji ima najveći utjecaj na prikazani intenzitet potresanja. U tim slučajevima dat je precizniji prikaz raspodjele intenziteta i radijusa trešnje. Pri izradi karata scenarija jako je važno precizno odrediti pružanje i smjer rasjeda.

Iako izrađene karte daju dobar uvid u ugrožena područja, sa sigurnošću možemo reći da taj uvid još nije dovoljno precizan te da se vrijednosti sigurno precjenjuju ili podcjenjuju. Razlog je odabir atenuacijskih relacija koje su jako važan alat, odabir relacija za pretvaranje

gibanja u intenzitet, nedovoljno precizna geologija, rijetka mreža seizmoloških stanica ili pak odstupanje ljestvica makroseizmičkog intenziteta. Instalacijom i prilagodbom programa na područje Hrvatske, gdje bi se izvele i koristile odgovarajuće relacije za Hrvatsku te još detaljnije analizirala prostorna korekcija, povećala bi se preciznost prikazanih komponenti i distribucije potresanja. Osim toga u budućnosti bi se trebala prilagoditi i ljestvica intenziteta potresa na Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK) ljestvicu, korištenu u Hrvatskoj.

Međutim, uz sve navedeno, izračunate karte opasnosti pokazuju dobro podudaranje s postojećim kartama izoseista, a čime već i uz ulazne podatke korištene u ovom radu daju solidnu procjenu seizmičke opasnosti u slučaju potresa na području Hrvatske.

7. Literatura

- [1] Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori H, Scrivner, C.W. and C.B. Worden (1999): Trinet 'ShakeMaps': rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. *Earthq.*, Vol. 15, p. 537.
- [2] Worden, C. B and D. J. Wald (2016): ShakeMap Manual, version 2.0, 1-113.
- [3] Yamakawa, K. (1998): The Prime Minister and the earthquake: Emergency anagement headership of Prime Minister Marayama on the occasion of the Great Hanshin-Awaji erthquake disaster. *Kansai Univ. Rev. Law and Politics*, 19, p. 13-55
- [4] Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., Fiket, T., Kuk, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Dasović, I. and J. Stipčević (2018): Seismicity of Croatia in the period 2006-2015. *Geofizika*, 0352-3659.
- [5] Markušić, S. and M. Herak (1998): Seismic zoning of Croatia. *Natural Hazards*, 18, 269-285.
- [6] Wald, D. J., Worden, C. B., Quitoriano, V. and K. L. Pankow (2006): ShakeMap Manual, Technical Manual, Users Guide, and Software Guide: <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/pdf/508TM12-A1.pdf>.
- [7] Schwartz, R. and T. Phoenix: *Learning Perl*. 5th Edition. O'Reilly Media, 2009.
- [8] Michelini, A., Faenza, L., Lauciani, V. and L. Malagnini (2008): Shakemap implementation in Italy. *Seismol. Res. Lett.*, 79, Vol. 5, 688–697.
- [9] Mreža seizmoloških postaja, http://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/seizmologija/velebit/mreza_velebit-net , 15.05.2018.
- [10] Wald, D. J., C. B. Worden, V. Quitoriano, and K. L. Pankow (2006): ShakeMap Software Guide.
- [11] Akkar, S. and J. J. Bommer (2007): Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and the Middle East. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97(2), 511-530.
- [12] Worden, C.B., Gerstenberger, M.C., Rhoades, D.A. and D.J. Wald (2012): Probabilistic Relationships Between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102(1), 204-221.
- [13] Borchardt, R. (1994): Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthq. Spectra*, 10, Vol. 4, 617–653.

- [14] Hrvatski geološki institut: https://www.hgi-cgs.hr/geoloska_karta_Hrvatske_1-300_000.htm, 15.05.2018.
- [15] Stanko, D., Markušić, S., Ivančić, I., Gazdek, M. and Z. Gülerce (2017): Preliminary Estimation of Kappa Parameter in Croatia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1755-1307.
- [16] Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I. and M. Herak (2006): Seismicity of Croatia in the period 2002– 2005. Geofizika, 23, 87–103.
- [17] Roger, M. W., Musson, G. G. and M. Stucchi (2009): The comparison of macroseismic intensity scales. J. Seismol. Vol. 14, 413–428.
- [18] Maps - General Information: <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/about.html/>, 23.04.2018.
- [19] Veliki Dubrovački potres 1667. godine: https://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/seizmologija/geof_povijest#DBK1667 , 16.5.2018.
- [20] Markušić, S., Ivančić, I. and I. Sović (2017); The 1667 Dubrovnik earthquake – some new insights. Studia geophysica et geodaetica, 61, 3; 587-600.
- [21] Vinodolski potres 1916. godine: https://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/seizmologija/geof_povijest#DBK1667, 23.04.2018.
- [22] Potresi na zagrebačkom području: http://www.hgi-cgs.hr/zagreb_potresi.html, 23.04.2018.
- [23] Prelogović, E., Bognar, A. and D. Mihaljević (1997): Geomorphological evidence of neotectonic activity in NW-Croatia. Z. Geomorph. N. F., Suppl-Bd.. 100, p. 27-36.
- [24] Seizmičnost i potresna opasnost na Makarskom primorju: http://www.pilar.hr/wp-content/images/stories/dokumenti/zbornici/40/mpd_knjiga_265.pdf/, 23.04.2018.
- [25] Herak, M., Orlić, M. and M. Kunovec-Varga (2001): Did the Makarska earthquake od 1962 generate a tsunami in the central Adriatic archipelago? Journal of Geodynamisc. 31, 1; 71-86.
- [26] Markušić, S., Herak, D., Ivančić, I., Sović, I., Herak, M. and E. Prelogović (1998): Seismicity of Croatia in the period 1993-1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996. Geofizika. 15, 83-101.